

Campus goes CO₂₀₃₀ ?

Die Ableitung eines modellhaften Umsetzungsplans für die Erreichung der Klimaschutzziele 2030 des Landes Baden-Württembergs am Beispiel des Gebäudebestandes der Universität und des Universitätsklinikums Tübingen.

Dissertation

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Eberhard Karls Universität Tübingen

zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von

Diplom-Geographin Sandy-Cheril Manton

aus St. Georgen

Tübingen

2023

Gedruckt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Eberhard Karls Universität Tübingen.

Tag der mündlichen Qualifikation: 10. 07. 2023

Dekan: Prof. Dr. Thilo Stehle

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Volker Hochschild

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Thomas Pothast

3. Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. Olaf Kühne

Vorwort und Danksagung

Herrn Professor Dr. Volker Hochschild danke ich für die freundliche Übernahme der Hauptbetreuung des Projekts und meiner Promotion. Volker Hochschild hat mich über viele Jahre intensiv betreut, motiviert und unterstützt. Viele Fragestellungen der Geographie und Geoinformatik erschlossen sich mir während der wissenschaftlichen Arbeit und ich genoss ein freundschaftliches Promotionsverhältnis.

Herrn Professor Dr. Thomas Potthast danke ich für die freundliche Übernahme der Zweibegutachtung. Thomas Potthast hat mich an die Komplexität der Nachhaltigkeitsforschung herangeführt und ermöglichte es mir an wichtigen universitätsinternen Debatten des Beirats für Nachhaltige Entwicklung und an Veranstaltungen des Internationalen Zentrums für Ethik in den Wissenschaften (IZEW) teilzunehmen.

Herr Diplom-Ingenieur Jürgen Bunzel, Geschäftsbereichsleiter des Technischen Betriebsamtes (tba), danke ich für die Aufnahme in sein Team Energiemanagement (2010-2012) und die Chancen, die sich aus dieser Praxiserfahrung für mich ergaben.

Herr Professor Dr. Rainer Luick und seinen Mitarbeitern Christoph Schlotter und Jan Springorum danke ich für die fachliche Orientierungshilfe und die Übergabe wichtiger Erfahrungen im Umgang mit energierelevanten GIS-Daten während meiner Einarbeitungsphase 2011.

Herrn Professor Dr. Martin Brunotte, Dr. Jakob Sierig, Geschäftsführer der Firma Ruoff Reutlingen und Jürgen Weinmann, Fachberater der Firma Viessmann für ihre fachkompetenten Auskünfte und Hilfestellungen.

Frau Hedwig Ogrzewalla, Umweltkoordinatorin der Universität Tübingen
für ihre freundliche Unterstützung und den intensiven Austausch.

Das Ministerium für Wissenschaft, Kunst und Forschung hat die Förderung im Rahmen des Innovations- und Qualitätsfonds (IQF), Förderrunde 2012 für die Jahre 2013-2016 bewilligt und mir eine projektinterne Promotion ermöglicht.

Ich bedanke mich bei allen Studierenden, die mit ihrer Arbeit dazu beigetragen haben, das Projekt voranzubringen. Sie haben zum Projekterfolg beigetragen und auch meine Promotion unterstützt: Sarah Lehmann, Matthias Stängel, Karsten Hager, Christian Sommer, Christian Bödinger, Saskia Hurle, Janne Pöppelmann, Matthias Leicht.

This is dedicated to my beloved family.

“Keep calm and carry on.”



I. Inhaltsverzeichnis

I.	Vorwort und Danksagung	III
II.	Inhaltsverzeichnis	IV
III.	Abbildungsverzeichnis	XI
IV.	Tabellenverzeichnis.....	XVI
V.	Abkürzungsverzeichnis.....	XVIII
VI.	Einheiten.....	XXI
VII.	Kurzfassung – Deutsch	XXII
VIII.	Abstract – English.....	XXIII
1.	Einleitung.....	24
2.	Struktur und Zielsetzung.....	26
3.	Interdisziplinärer Forschungsstand	30
3.1.	Geographie der Energien - Energiegeographie	30
3.1.1.	Die Klimarelevanz des Raumes	31
3.1.2.	Neue Ansprüche an den Raum durch erneuerbare Energien	33
3.1.3.	GIS - GIScience and Energies	34
3.1.4.	CAFM - 3D - im Einsatz für Universitätskonzepte	36
3.2.	Weg vom Öl und Gas – Klimaschutz in Theorie und Praxis.....	39
3.2.1.	Die Verankerung der Klimaschutzziele und ihre Umsetzung	40
3.2.2.	Die Verschärfungen des Klimaschutzgesetzes seit 2021 auf Bundesebene.....	41
3.2.3.	Klimaschutz im Gebäudesektor.....	43
3.2.4.	Eine klimaneutrale Landesverwaltung 2030 in Baden-Württemberg.....	44
3.2.5.	Die Förderung der staatlichen Vermögens- und Hochbauverwaltungen (VuB).....	47
3.2.6.	Entwicklung des Energieverbrauchs und -kosten in Baden-Württemberg	50
3.3.	Entwicklung der CO₂-Emissionen des Energieverbrauchs.....	53
3.3.1.	Anreize für den Ausbau der erneuerbaren Energien	55
3.3.2.	Die gesetzliche Grundlage für erneuerbare Energien (EE).....	57
3.3.3.	Die EEG-Einspeisevergütung und Umlage für erneuerbare Energien	58
3.3.4.	Positive Effekte erneuerbarer Energien auf CO ₂ -Emissionen	62
3.3.5.	Emissionshandelssystem für Treibhausgase	63
3.3.6.	Die Ermittlung von CO ₂ -Emissionen durch geltende CO ₂ -Äquivalente	66
3.3.7.	Verwendung der CO ₂ -Äquivalente	70
3.3.8.	Reflexion zur CO ₂ -Bepreisung	72
3.4.	Energie- und Gebäudemanagement.....	78
3.4.1.	Energetische Sanierung und Denkmalschutz	79
3.4.2.	Verordnungen für energiesparende Neubauten	80
3.4.3.	CO ₂ -neutral - CO ₂ -frei, klimaneutral oder Climate positive- Was nun?	84
3.4.4.	Von Monitoring bis Nutzer-Sensibilisierung	86
3.5.	Das wachsende Verantwortungsbewusstsein für Nachhaltigkeit.....	87

3.5.1.	Nachhaltigkeit an deutschen Hochschulen – Das Netzwerk HOCHN	91
3.5.2.	Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE).....	92
3.5.3.	Von nachhaltig zu klimaneutral - ein weiter Weg?	94
4.	<i>Forschungsdefizit</i>	97
5.	<i>Vorstellung des Untersuchungsgebiets in Tübingen</i>	98
5.1.	<i>Entwicklungen im Gebäudebestand</i>	99
5.1.1.	Energie- und Umweltmanagement der Universität Tübingen	101
5.1.2.	Darstellung des Energieverbrauchs der Universität Tübingen.....	103
5.1.3.	Darstellung der CO ₂ -Emissionen von Universität und Klinikum.....	104
5.2.	<i>Lokale Rahmenbedingungen für erneuerbare Energien.....</i>	105
5.2.1.	Geologische Voraussetzungen	105
5.2.2.	Einschränkende Faktoren für Erdwärmegewinnung.....	108
5.2.3.	Solare energetische Voraussetzungen.....	114
5.2.4.	Stadtbild-Verordnung der Stadt Tübingen	118
5.3.	<i>Datengrundlage</i>	119
5.3.1.	Geothermische Datengrundlage	121
5.3.2.	Solare Datengrundlage.....	121
5.3.3.	Digitales Geländemodell (DEM)	122
5.3.4.	Das digitale Oberflächenmodell (DOM)	123
5.3.5.	Digitalisierung der Dachflächen	125
5.3.6.	Energieverbrauchswerte und Kostenangaben	126
5.3.7.	Aufbau der relationalen Datenbank.....	126
5.3.8.	Verknüpfung der Ausgangsdaten.....	128
6.	<i>Methoden der Flächenbewertung</i>	129
6.1.	<i>Bestimmung der Indikatoren für die Flächenbewertung</i>	130
6.1.1.	Gewichtete Rangfolgenbildung nach Indikatoren.....	131
6.2.	<i>Simulation des geothermischen Potenzials.....</i>	134
6.2.1.	Extraktion des Erdwärmepotenzials	136
6.2.2.	Flächendeckende Anlagenkonfiguration für Erdwärmepotenzial.....	137
6.2.3.	Flächendeckende Anlagenkonfiguration für den Wärmeenergie-Verbrauch.....	138
6.2.4.	Ermittlung des nutzbaren Energiepotenzials (Nutzenergie)	138
6.2.5.	Ermittlung der maximalen Heizleistung.....	139
6.2.6.	Festlegen der Jahresarbeitszahl (JAZ) und Leistungszahl (COP).....	139
6.2.7.	Auslegung des Erdsondenfeldes	140
6.2.8.	Kalkulation der Anfangsinvestition für Erdwärme	142
6.2.9.	Die Gesamtkosten (€/a) und Preis pro Energieeinheit (€/kWh)	146
6.2.10.	Ermittlung der Einnahmen durch Erdwärme	147
6.3.	<i>Simulation des solarenergetischen Potenzials</i>	147
6.3.1.	Berechnung des Strompotenzials aus Photovoltaik.....	147
6.3.2.	Ermittlung der installierten Leistung (kWp) anhand der Modulanzahl.....	148

6.3.3.	Berechnung der Nennleistung über den Flächenbezug	150
6.3.4.	Ermittlung des spezifischen Jahresertrags (in kWh)	150
6.3.5.	Kalkulation der Anfangsinvestitionen für PV-Strom	152
6.3.6.	Ableitung des Kostenfaktors Anfangsinvestition	154
6.3.7.	Kalkulation der Betriebskosten mit prozentualem Faktor (F PV OE 2,5 %).....	156
6.3.8.	Die Gesamtkosten (€/a) und Preis pro Energieeinheit (€/kWh) von PV	156
6.3.9.	Ermittlung der Einnahmen und Ausgaben nach EEG 2016 durch PV-Strom.....	157
6.4.	CO₂-Bewertung von Erdwärme und Photovoltaik.....	160
6.4.1.	CO ₂ -Bewertung des Wärme- und Stromverbrauchs (2015).....	161
6.4.2.	Beispielhafte Kalkulation der CO ₂ -Besteuerung des Energieverbrauchs	161
7.	Vorstellung und Interpretation der Ergebnisse	164
7.1.	Analyse der Untersuchungsflächen	164
7.1.1.	Analyse der Teildachflächen	165
7.1.2.	Analyse der Gebäudegrundflächen.....	167
7.2.	Flächenbewertung nach Indikatoren	167
7.2.1.	Verteilung nach Erdwärmepotenzial - Indikator 1a (kWh/m ²)	168
7.2.2.	Verteilung nach Heizlast - Indikator 1b (kWh/m ²)	169
7.2.3.	Erdwärme - Indikator 2a (Euro/kWh).....	170
7.2.4.	Erdwärme - Indikator 2b (Preis pro Sondenmeter Euro/m).....	170
7.2.5.	Erdwärme - Indikator 3a CO ₂ -Wert (in t CO ₂ pro Jahr)	171
7.2.6.	Verteilung nach PV-Energiepotenzial - Indikator 1a (kWh/m ²)	172
7.2.7.	Verteilung nach PV-Jahresertrag - Indikator 1b (kWh/m ²)	173
7.2.8.	Photovoltaik-Strom - Indikator 2a (Euro/kWh).....	174
7.2.9.	Photovoltaik-Strom - Indikator 2b (Euro/m ²).....	176
7.2.10.	Photovoltaik-Strom - Indikator 3a CO ₂ -Wert (in t CO ₂ pro Jahr).....	177
7.2.11.	Energieverbrauch: Indicators 4: Verbrauch Strom und Verbrauch Wärme.....	178
7.2.12.	Verteilung Wärmeverbrauch - Indikator 2a Preis pro Energieeinheit - Wärme	178
7.2.13.	Verteilung Stromverbrauch - Indikator 2a Preis pro Energieeinheit - Strom	180
7.3.	Ergebnisse der gewichteten Rangfolgenbildung mit Indikatoren.....	182
7.3.1.	„Tübingens next top places for renewable energies “	182
7.3.2.	„Tübingens worst Places“	185
7.4.	Darstellung der Gesamtergebnisse.....	186
7.4.1.	Berücksichtigte Energieverluste bei Erdwärme: Was bleibt nutzbar?	186
7.4.2.	Berücksichtigte Energieverluste bei Photovoltaik-Strom: Was bleibt nutzbar?	188
7.4.3.	CO ₂ -Emissionen als Gesamtergebnis	190
7.4.4.	CO ₂ -Emissionen des Stromverbrauchs und -potenzials	191
7.4.5.	CO ₂ -Emissionen des Wärmeverbrauchs und -potenzials.....	192
7.4.6.	Anfangsinvestition und Betriebskosten für Photovoltaik und Erdwärme.....	194
7.4.7.	EEG-Einspeisevergütung und EEG-Umlage für das Energiepotenzial	196
7.5.	Klimaneutrale Universität Tübingen bis 2030 - 2040 - 2050.....	198
7.5.1.	Szenario CO ₂ -neutral → CO ₂ -frei → Klimaneutral	198

7.5.2.	Szenario CO ₂ -Reduzierung in Stufen 2030-2040-2050.....	200
7.5.3.	Szenario <i>Campus goes CO₂₀₃₀</i>	202
7.5.4.	Szenario Jährliches Budget - ein fester Finanzrahmen pro Jahr	205
7.6.	<i>Ergebnisse zu weiterführenden Fragestellungen</i>	206
7.6.1.	Versteckte Kosten der CO ₂ -Besteuerung	206
7.6.2.	Szenario „Solarstrom Universität Tübingen“	209
7.6.3.	Szenario „Erdwärme Universität Tübingen“	210
7.6.4.	Kostenszenarien für die Universität Tübingen	211
8.	<i>Zusammenfassung</i>	214
9.	<i>Diskussion</i>	216
9.1.	Die Aussagekraft der Ergebnisse.....	216
9.2.	Die Verknüpfung von Geoinformatik mit Nachhaltigkeit und Klimaschutz	217
9.3.	CO ₂ -Bilanzierung für Klimaschutzmaßnahmen	218
9.4.	Fragen zur Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen	219
10.	<i>Ausblick</i>	221
10.1.	Erweiterung der Geodatenbasis- Wieso nicht Kompetenzen nutzen?	221
10.2.	Potenzialanalyse zu Solarthermie auf Universitätsdächern.....	222
10.3.	Flachdach-Analyse für Dachbegrünung als CO ₂ -Bindungsmaßnahme.....	222
10.4.	Sonderforschungsbereich „Campus goes CO ₂₀₃₀ “- Ein exzellentes Klimaschutzkonzept?	223
XI.	<i>Literaturverzeichnis</i>	247
XII.	<i>Anhang 1: Listen der Rangfolgen nach Indikatoren</i>	268
(1)	Rangfolgenliste 1: Universität - Indikatoren 1a, 2a für Photovoltaik.....	268
(2)	Rangfolgenliste 2: Universitätsklinikum - Indikatoren 1a, 2a für Photovoltaik	269
(3)	Rangfolgenliste 3: Universität - Indikator 2a für Photovoltaik	270
(4)	Rangfolgenliste 4: Universitätsklinikum - Indikator 2a für Photovoltaik	271
(5)	Rangfolgenliste 5: Universität – Indikator 1a für Erdwärme	272
(6)	Rangfolgenliste 6: Universitätsklinikum - Indikator 1a für Erdwärme	273
(7)	Rangfolgenliste 7: Universität - Indikator 3a, 3b	274
(8)	Rangfolgenliste 8: Universitätsklinikum - Indikator 3a, 3b	275
(9)	Rangfolgenliste 9: Universität - Indikator 4a Wärmeverbrauch (2015).....	276
(10)	Rangfolgenliste 10: Universität - Heizölverbrauch (2015)	277
(11)	Rangfolgenliste 11: Universität – Erdgasverbrauch (2015).....	278
(12)	Rangfolgenliste 12: Universitätsklinikum - Indikator 4a Wärmeverbrauch (2015).....	279
(13)	Rangfolgenliste 13: Universitätsklinikum – Heizölverbrauch (2015)	280
(14)	Rangfolgenliste 14: Universitätsklinikum – Erdgasverbrauch (2015)	281
(15)	Rangfolgenliste 15: Universität - Indikator 4b Stromverbrauch (2015).....	282
(16)	Rangfolgenliste 16: Universitätsklinikums - Indikator 4b Stromverbrauch (2015).....	283
(17)	Rangfolgenliste 17: Universität - Gesamtkosten des Energieverbrauchs (2015).....	284
(18)	Rangfolgenliste 18: Universitätsklinikum - Gesamtkosten des Energieverbrauchs (2015)	285

(19) Rangfolge der besten Teildachflächen für Photovoltaik „Tübingens next top places“ – Top 20 der Universitätsgebäude (UNI) (eigene Darstellung)	286
(20) Rangfolge der besten Teildachflächen für Photovoltaik „Tübingens next top places“ – Top 20 des Universitätsklinikums (UNI) (eigene Darstellung)	287
(21) Rangfolge der besten Gebäudegrundflächen für Erdwärme „Tübingens next top places“ – Top 20 der Universitätsgebäude (UNI) (eigene Darstellung).....	288
(22) Rangfolge der besten Teildachflächen für Erdwärme „Tübingens next top places“ – Top 20 der Universitätsklinikumsgebäude (UKT) (eigene Darstellung)	289
(23) Rangfolgen der höchsten Energieverbraucher – „Tübingens worst places“ - Höchster Handlungsbedarf an Gebäuden der Universität (UNI)	290
(24) Rangfolgen der höchsten Energieverbraucher – „Tübingens worst places“ - höchster Handlungsbedarf an Gebäuden des Universitätsklinikums (UKT)	291
(25) Beispiel für die Verteilung des jährlichen Budgets für Photovoltaikanlagen für 2023 -2024 (eigene Darstellung).....	292

XIII. Anhang 2: Ausgewählte Karten (nur in der Druckversion der Abgabeverision (DIN A4)

Kartenblatt 1: Indikator 1a Energiepotenzial Photovoltaik
Kartenblatt 7: Indikator 1a Energiepotenzial Erdwärme
Kartenblatt 9: Indikator 2a Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh) Erdwärme
Kartenblatt 13: Benötigte Heizlast zur Wärmebedarfsdeckung Erdwärme
Kartenblatt 16: Wärmeverbrauch (2015) (Fernwärme, Heizöl, Erdgas)
Kartenblatt 19: Stromverbrauch (2015) (100% Ökostrom)
Kartenblatt 22: Gesamtkosten (2015) für Strom/Wärme pro Standort
Kartenblatt 24: Erdwärme Potenzial mit Wärmeverbrauch in kWh/a
Kartenblatt 26: Solarpotenzial mit Stromverbrauch in kWh/a
Kartenblatt 27: Preis/Energieeinheit PV-Strompotenzial mit Preis/Energieeinheit (Euro/kWh) Stromverbrauch
Kartenblatt 28: Kartenausschnitt <i>Tübingens next top places</i> für Erdwärme Universität Tübingen
Kartenblatt 29: Kartenausschnitt <i>Tübingens next top places</i> für Erdwärme Universitätsklinikum
Kartenblatt 31: Kartenausschnitt <i>Tübingens next top places</i> für Photovoltaik Universität Tübingen
Kartenblatt 32: Kartenausschnitt <i>Tübingens next top places</i> für Photovoltaik Universitätsklinikum
Kartenblatt 33: Kartenausschnitt <i>Tübingens worst places</i> des Universitätsklinikums
Kartenblatt 34: Kartenausschnitt <i>Tübingens worst places</i> der Universität Tübingen

XV: Digitaler Anhang (nur in der Abgabeverision):

1) Ergebniskartenblätter zur Auswertung der Indikatoren (DIN A3)

Kartenblatt 1: Indikator 1a Energiepotenzial Photovoltaik.....
Kartenblatt 2: Indikator 1b Jahresertrag pro kWh/m ² Photovolthaik.....
Kartenblatt 3: Indikator 2a Preis pro Energieeinheit - Photovoltaik.....
Kartenblatt 4: Indikator 2b Preis pro Quadratmeter (Euro/m ²) Photovoltaik

Kartenblatt 5: Indikator 3a CO ₂ - Emissionen in CO ₂ t/m ² Photovoltaik	
Kartenblatt 6: Indikator 3b CO ₂ - Abgabe in Euro pro m ² Photovoltaik	
Kartenblatt 7: Indikator 1a Energiepotenzial Erdwärme	
Kartenblatt 8: Indikator 1b Energiepotenzial Erdwärme Heizlast pro Standort	
Kartenblatt 9: Indikator 2a Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh) Erdwärme	
Kartenblatt 10: Indikator 2b Preis pro Sondenmeter (Euro/m) Erdwärme	
Kartenblatt 11: Indikator 3a CO ₂ - Emissionen in CO ₂ t/m ² Erdwärme	
Kartenblatt 12: Indikator 3b CO ₂ - Abgabe pro Sondenmeter Erdwärme.....	
Kartenblatt 13: Benötigte Heizlast zur Wärmebedarfsdeckung Erdwärme	
Kartenblatt 14: Preis/Energieeinheit bei Wärmebedarfsdeckung Erdwärme	
Kartenblatt 15: CO ₂ -Emission der Erdwärme bei Wärmebedarfsdeckung	
Kartenblatt 16: Wärmeverbrauch (2015) (Fernwärme, Heizöl, Erdgas)	
Kartenblatt 17a: CO ₂ -Emissionen des Wärmeverbrauchs (2015)	
Kartenblatt 17b: Gesamtkosten für Wärmeversorgung (2015) 20 Jahre	
Kartenblatt 18a: CO ₂ -Emissionen des Wärmeverbrauchs	
Kartenblatt 18b: Gesamtkosten für Wärmeversorgung (2015) 20 Jahre.....	
Kartenblatt 19: Stromverbrauch (2015) (100% Ökostrom)	
Kartenblatt 20: CO ₂ -Emissionen des Stromverbrauchs (2015)	
Kartenblatt 21: Gesamtkosten für Stromversorgung (2015) 20 Jahre	
Kartenblatt 22: Gesamtkosten (2015) für Strom/Wärme pro Standort	
Kartenblatt 23: Gesamtkosten (2015) 20 J. Strom/Wärme/Standort.....	

2) Vergleichskarten – Kartenausschnitte in DIN A3 (nur in der Abgabeverision)

Kartenblatt 24: Erdwärme Potenzial mit Wärmeverbrauch in kWh/a	
Kartenblatt 25: Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh) Wärmebedarfsdeckung mit Wärmeverbrauch Erdwärme	
Kartenblatt 26: Solarpotenzial mit Stromverbrauch in kWh/a	
Kartenblatt 27: Preis/Energieeinheit PV-Strompotenzial mit Preis/Energieeinheit (Euro/kWh) Stromverbrauch...	
Kartenblatt 28: Kartenausschnitt Tübingens next Top places für Erdwärme Universität Tübingen	
Kartenblatt 29: Kartenausschnitt Tübingens next Top places für Erdwärme Universitätsklinikum	
Kartenblatt 30: Detailansicht Gebäude 7064 Auf dem Sand Jahresertrag Photovoltaik	
Kartenblatt 31: Kartenausschnitt Tübingens next Top places für Photovoltaik Universität Tübingen	
Kartenblatt 32: Kartenausschnitt Tübingens next Top places für Photovoltaik Universitätsklinikum	
Kartenblatt 33: Kartenausschnitt Tübingens worst places des Universitätsklinikums	
Kartenblatt 34: Kartenausschnitt Tübingens worst places der Universität Tübingen.....	
Kartenblatt 35: Detailansicht Gebäudekomplex Schnarrenberg-Kliniken Kilowattpreis Photovoltaik.....	

3) Digitale Datengrundlage (nur in der Abgabeverision)

a) Geodaten, Gebäudedaten, Attributdaten:

- Anleitung: Beschreibung der Geodaten, Attributdaten in Datenblättern mit Screenshots (pdf.doc).....
- Basisdaten: Geologische und klimatologische Datengrundlage, räumliche Daten, Potenzialwerte.....
- Attributdaten: Gebäudespezifische Energieverbrauchs- und Kostenwerte, Flächenangaben, Kennzahlen.....

b) ESRI - ArcGIS-Projekt (erstelltes GIS-Projekt der Dissertation)

- importierte Basisdaten, Attributdaten, Verknüpfungen (Joints mit Exceltabellen).....
- shape-files in ARCMAP (Potenzialanalysen, Energieverbrauch, Kostenkalkulation, CO₂-Bestimmung,

c) Wertetabellen (eigene Erstellung mit Beschreibung der Berechnungen in Kommentaren (Excel.xlsx)

- Erdwärme: Potenzialwerte nach Polygonen, Anlagenkonfiguration, Investitionskalkulation, CO₂-Bestimmung.....
- Photovoltaik: Potenzialwerte nach Polygonen, Anlagenkonfiguration, Investitionskalkulation, CO₂-Bestimmung..
- Energieverbräuche und Kosten: nach Energieträgern, Umrechnungen in CO₂, Zuweisung Indikatoren.....
- Indikatoren und Rangfolgenbestimmung mit Gewichtung (Tabelle mit finaler Standortbewertung).....

d) Tabellarische Beschreibung der Methodik (eigene Dokumentation Rechengänge (Word.doc)

- Geothermie/ Erdwärme, Photovoltaik, Energieverbräuche.....
- Anlagenkonfiguration, Investitionskalkulation.....
- Indikatorenbestimmung, gewichtete Rangfolgenbildung.....

e) Literaturdatenbank Verwendete Literatur (pdf.doc)

f) Informationen

g) Veröffentlichungen (pdf.docs)

II. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: GIScience beansprucht eine holistische Schnittstelle als Verbindungswissenschaft darzustellen. (KMOCH,2017)	35
Abb. 2: Facilitymanagement - CAFM (DocuWare 2022)	37
Abb. 3: Thermographie am Altbau (Kraftwerker 2021)	38
Abb. 4: Zielsetzungen der Energiewende in Deutschland (MUK BW 2016).....	41
Abb. 5: Generationenvertrag für das Klima -Bundesklimaschutzgesetz (BGV 2021).....	42
Abb. 6: Bisheriger und künftig erforderlicher energetischer Kostenanteil der Bauprogramme für den staatlicher Hochbau (MF BW 2020a)	49
Abb. 7: Energieszenario 2050 – Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen und jeweilige Beiträge der erneuerbaren Energien	50
Abb. 8: Energieszenario 2050 – Die Entwicklung des Bruttostromverbrauchs (MUK BW 2016).....	51
Abb. 9: Erneuerbare Energien – Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch und am Bruttoendenergieverbrauch (BMW 2016)	51
Abb. 10: Zielpfad für den CO ₂ -Ausstoß bis 2050 für Landesbauten (aus MUK BW 2020a	53
Abb. 11: Auswirkungen klimaschützender Maßnahmen auf CO ₂ -Emissionen (MF BW 2020a)	54
Abb. 12: Entwicklung der PV-Fläche auf landeseigenen Liegenschaften bis 2018 (MUK BW 2016).....	54
Abb. 13: Erneuerbare Energien: Anteil in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (UBA 2021a)	55
Abb. 14: Erneuerbare Stromerzeugung in Deutschland in TWH (Mrd. kWh) (eigene Darstellung nach Quaschnig 2020)	56
Abb. 15: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen in Deutschland in Mt von 1990–2025 (Mrd. kg) (eigene Darstellung nach Wissenschaftliche Statistiken: Quaschnig 2020)	57
Abb. 16: Degressionssätze Januar 2021 - Januar 2022 (BNA 2020)	59
Abb. 17: Strompreis für die Industrie (BEW 2022).....	59
Abb. 18: Entwicklung der EEG-Umlage 2012-2022 (BMW 2018+ BNA 2020)	60
Abb. 19: CO ₂ -Emissionen in Deutschland (Quaschnig 2020)	63
Abb. 20: Wie viel CO ₂ dürfen die Deutschen Kraftwerke noch ausstoßen? Der Kohleausstieg für Deutschlands Beitrag zum 2°-Ziel? (Öko-Institut 2019).....	66
Abb. 21: Vergleich der Emissionswerte nach Energieträgern (Großkloß 2014; In IINAS 2014)	69
Abb. 22: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des deutschen Kraftwerkparcs je modelliertem Szenario (Huneke 2017:23)	74
Abb. 23: CO ₂ -Steuer als Ergänzung zu einem EUA -Mindestpreis (Huneke 2017: 21)	75

Abb. 24: Übersicht der CO ₂ -Bepreisung in Szenarien mit einer nationalen CO ₂ -Steuer (Huneke 2017: 23)	75
Abb. 25: Einführung einer CO ₂ -Steuer auf CO ₂ -Emissionen (Huneke, 2017: 24)	76
Abb. 26: Treibhausgasspezifische Steuerbelastung verschiedener Energieformen (Zech et al. 2018).....	77
Abb. 27: Beispiel eines Energieausweises (Architektenkammer Baden-Württemberg 2021).....	80
Abb. 28: Primärenergiebedarf - Heizung [kWh/m ² a] (Oehler 2018:78)	81
Abb. 29: Raumwärmebedarf pro Person (Oehler 2018, nach Venjakob & Hanke).....	81
Abb. 30: PDCA-Zyklus HOCH ^N (HOCH ^N 2018: 20)	83
Abb. 31: Wir haben kein Energieproblem, sondern ein CO ₂ -Problem (Oehler 2018:38).....	83
Abb. 32: Projektziele HOCH ^N (Bassen et al, 2018: 66).....	92
Abb. 33: Ziele der Hochschul-BNE (HOCH ^N 2018: 31)	94
Abb. 34: Aktivitäten des Wertschöpfungskreises einer Hochschule (Bassen 2017: 66)	94
Abb. 35: Kriterien für die Ausgestaltung der Bausteine (HOCH ^N 2018: 20)	95
Abb. 36: Übersichtskarte: Verteilung der Universitätsgebäude im Stadtgebiet Tübingen (eigene Darstellung)..	99
Abb. 37: Gesamtwärmeverbrauch (Uni TÜ 2019).....	103
Abb. 38: Stromverbrauch (Uni TÜ 2019).....	103
Abb. 39: Anteil erneuerbarer Energien an Wärme und Strom (in %) (UNI TÜ 2019).....	103
Abb. 40: Gesamtemissionen von Treibhausgas (t CO ₂ -Äquivalent) (Uni TÜ 2019)	104
Abb. 41: Energieverbrauch der Universität und des Universitätsklinikums Tübingen (Stand 2015)	104
Abb. 42: Vereinfachte Schichtenabfolge im Stadtgebiet Tübingen (digital übertragen nach Hahn & Schädel). 106	
Abb. 43: Geologische Karte nach Hahn & Schädel (1973) (digital überarbeitet, eigene Darstellung).	107
Abb. 44: Wasserschutzgebiete auf der Gemarkung Gemeinde und Landkreis Tübingen (LUBW 2022a).....	109
Abb. 45: Zulässigkeit von Erdwärmesonden im Landkreis Tübingen - Ausschnitt (LRA TÜ 2022)	112
Abb. 46: Funktion und Wärmequelle (BWP 2021)	113
Abb. 47 Aufbau eines Erdwärmesondenfeldes (Quaschnig (2018).....	113
Abb. 48+49: Globalstrahlung BRD (1981-2010) Mittlere Monats- und Jahressummen (DWD 2021).....	114
Abb. 50-51-52: Solareinstrahlung im Untersuchungsgebiet: direkte, diffuse und Gesamtstrahlung im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung).	116
Abb. 53: Analytisches Hillshade der Neuen Aula Universität Tübingen (SOMMER 2015).	117
Abb. 54: Sonneneinstrahlungswinkel im Jahresverlauf (Quaschnig, 2018)	117
Abb. 55 + 56: Berechnung von Solareinstrahlung und Entfernung (Quaschnig, 2018).....	118

Abb. 57: Auszug des Solarpotenzialanalyse (Manton et al 2016)	119
Abb. 58: Das digitale Geländemodell aus LIDAR Daten 2013: Die Hillshade Darstellung verdeutlicht die Höhenlagen im Farbverlauf Blau (Täler) Rot (Höhen). Die Abstufungen lassen das Relief erkennen (Pixelgröße 1*1m, Gauß-Krüger/Zone3/Bessel 1841, eigene Darstellung).	122
Abb. 59: Ausschnitt aus dem digitalen Oberflächenmodell – DOM1. Teilgebiet von Tübingen Innenstadt und Kliniken (Pixelgröße 1*1m, Gauß-Krüger/Zone3/ Bessel 1841, eigene Darstellung).....	122
Abb. 60: Ausschnitt aus dem DOM/60cm /5 m und 1 m (eigene Darstellung).....	123
Abb. 61: Ausschnitte aus dem 3D-Model, DOM (LVA 2008 und 2012/LIDAR).....	123
Abb. 62: Spline-Interpolation (Sommer 2015, unveröffentlicht).	124
Abb. 63: Inverse-Distance Weighting (IDW) Interpolation (Sommer 2015, unveröffentlicht).	124
Abb. 64: Krigingverfahren - Nearest Neighbour (Sommer 2015, unveröffentlicht).....	124
Abb. 65: Dichte der Punktwolke (Sommer 2015, unveröffentlicht).....	124
Abb. 66: Slope (Sommer, 2015 unveröffentlicht)	125
Abb. 67: Hillshade (Sommer, 2015 unveröffentlicht)	125
Abb. 68: Darstellung der Arbeitsschritte dieser Dissertation (eigene Darstellung)	129
Abb. 69: Ausschnitt aus ArcGIS-Projekt: Abfrage per Infobutton pro Gebäude (eigene Darstellung).....	130
Abb. 70: Das Erdwärmepotenzial in Tübingen als Jahresleistung (Jahresarbeit in kWh/a) Manton 2015	136
Abb. 71: Vitocal 350-G-Pro Wärmepumpe (VIESSMANN 2018)	138
Abb. 72: Angaben zum Modul-Typ Elite High Efficiency Module (ET SOLAR 2020)	149
Abb. 73: Aufteilung der Untersuchungsflächen (eigene Darstellung)	165
Abb. 74: Größenverteilung aller Teildachflächen nach m ² (eigene Darstellung).....	165
Abb. 75: Darstellung der Teildachflächen mit einer Größe von mindestens 20 m ² -100 m ² und deren Jahresertrag in kWh/a (eigene Darstellung)	166
Abb. 76: Darstellung der 17 größten Teildachflächen zwischen 1.000 – 3.964 m ² und dem Jahresertrag in kWh/a (eigene Darstellung).....	166
Abb. 77: Größenverteilung aller Gebäudegrundflächen nach m ² (eigene Darstellung)	167
Abb. 78: Indikator 1a Energiepotenzial Verteilung des Erdwärmepotenzials auf 259 Standorte (kWh/a, eigene Darstellung).....	168
Abb. 79: Übersichtskarte des Wärmeverbrauchs im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung).....	169
Abb. 80: Verteilung des Gesamtpotenzials pro Gebäudegrundfläche (in kWh/area) im Jahr für Erdwärme	169
Abb. 81: Indikator 2a Erdwärme Verteilung des Preises pro Energieeinheit (Euro/kWh, eigene Darstellung) ..	170
Abb. 82: Indikator 2b Erdwärme Verteilung des Preises pro Sondenmeter (Euro/m, eigene Darstellung).....	171

Abb. 83: Indikator 3a Verteilung des CO ₂ -Wertes in kg pro Fläche (eigene Darstellung)	171
Abb. 84: Indikator 1a Energiepotenzial: PV-Strom Verteilung der Sonneneinstrahlung auf 1.311 Teildachflächen in kWh/a (eigene Darstellung)	172
Abb. 85: Verteilung des PV-Gesamtpotenzials pro Teildachfläche (kWh/area pro Jahr) (eigene Darstellung) ..	172
Abb. 86: Übersichtskarte Indikator 1a Energiepotenzial Photovoltaik (eigene Darstellung).....	173
Abb. 87: Kartenausschnitt Indikator 1b Jahresertrag - Teildachflächen Photovoltaik (eigene Darstellung)	174
Abb. 88: Indikator 2a PV-Strom Verteilung des Preises pro Energieeinheit (Euro/kWh) (eigene Darstellung) ..	175
Abb. 89: Übersichtskarte Indikator 2a Preis pro Energieeinheit Photovoltaik (eigene Darstellung)	175
Abb. 90: Kartenausschnitt Indikator 1b Jahresertrag - Teildachflächen Photovoltaik (eigene Darstellung)	176
Abb. 91: Indikator 2b PV-Strom Verteilung des Preises pro Quadratmeter (eigene Darstellung).....	177
Abb. 92: Indikator 3 PV-Strom Verteilung CO ₂ -Wert in t CO ₂ /m ² (eigene Darstellung).....	177
Abb. 93: Indikator 4a Preis pro Energieeinheit (Kilowattpreis) des Wärmeverbrauchs (eigene Darstellung)	179
Abb. 94: Übersichtskarte Wärmeverbrauch im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung).....	180
Abb. 95: Indikator 2a Preis pro Energieeinheit für Stromverbrauch (eigene Darstellung)	181
Abb. 96: Übersichtskarte Stromverbrauch im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung).....	182
Abb. 97: Kartenausschnitt: „Tübingens next Top-Places for renewable energies“ -Indikatorenbewertung mit Ausweisung der Rangplätze für Erdwärme am Universitätsklinikum (eigene Darstellung).....	183
Abb. 98: Kartenausschnitt: „Tübingens next Top-Places for renewable energies“ -Indikatorenbewertung mit Ausweisung der Rangplätze für Erdwärme am Universitätsklinikum (eigene Darstellung).....	183
Abb. 99: Kartenausschnitt: Kartenausschnitt: „Tübingens next Top-Places for renewable energies“ - Indikatorenbewertung mit Ausweisung der Rangplätze für Photovoltaik der Universität (eigene Darstellung) 184	184
Abb. 100: Kartenausschnitt: Kartenausschnitt: „Tübingens next Top-Places for renewable energies“ - Indikatorenbewertung mit Ausweisung der Rangplätze für Photovoltaik am Universitätsklinikum (eigene Darstellung).....	184
Abb. 101: Kartenausschnitt: Kartenausschnitt: „Tübingens worst Places“ -Indikatorenbewertung nach Verbrauch, Kosten und CO ₂ -Werten mit Ausweisung der Rangplätze des Universitätsklinikums (eigene Darstellung).....	185
Abb. 102: Kartenausschnitt: Kartenausschnitt: „Tübingens worst Places“ -Indikatorenbewertung nach Verbrauch, Kosten und CO ₂ -Werten mit Ausweisung der Rangplätze der Universität Tübingen (eigene Darstellung).....	186
Abb. 103: Erdwärmepotenzial – Wieviel Energie bleibt nutzbar? (eigene Darstellung)	187
Abb. 104: Photovoltaikpotenzial - Wieviel Energie bleibt nutzbar? (eigene Darstellung)	189
Abb. 105: CO ₂ -Bewertung des Energieverbrauchs und des erneuerbaren Energiepotenzials (eigene Darstellung)	191
Abb. 106: CO ₂ -Emission des Stromverbrauchs – im Vergleich Ökostrom/Solarstrompotenzial (eigene Darstellung)	192

Abb. 107: CO ₂ -Emissionen des Wärmeverbrauchs - im Vergleich Fernwärme - Erdgas – Heizöl (eigene Darstellung)	193
Abb. 108: Simulation zur stufenweisen CO ₂ -Reduzierung: 2030 – 2040 – 2050 (eigene Darstellung)	201
Abb. 109: Simulation zur stufenweisen Verbrauchsreduzierung 2030 – 2040 – 2050 (eigene Darstellung)	203
Abb. 110: Mögliches CO ₂ -Steueraufkommen für Energieverbrauch und Energiepotenzial im Vergleich (eigene Darstellung)	207
Abb. 111: Mögliches CO ₂ -Steueraufkommen pro Energieträger im Vergleich für 1 GWh pro Jahr (eigene Darstellung)	207

III. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Absoluter Wärmeverbrauch in Gigawattstunden (MF BW 2020a)	52
Tab. 2: Absoluter Stromverbrauch in Gigawattstunden (MF BW 2020a)	52
Tab. 3: Stromkosten in Mio. Euro (MF BW 2020a)	52
Tab. 4: Wärmekosten in Mio. Euro (MF BW 2020a)	52
Tab. 6: Auflistung der CO ₂ -Äquivalente (IPCC 2014)	66
Tab. 7: Eigene Zusammenstellung: Ausschnitt CO ₂ -Äquivalente für diese Arbeit (nach GROßKLOS, 2014)	71
Tab. 8: CO ₂ -Steuer seit 1.1.2021 (Brennstoffemissionsgesetz (BEHG): BRD 2019).....	77
Tab. 9: Aufstellung der zu kompensierenden CO ₂ -Emissionen (nach Energieverbrauch 2015) bis 2030 (eigene Darstellung berechnet mit GEMIS 4.93. 2014/2018)	105
Tab. 10: Auszug aus Deutscher Wetterdienst Stuttgart: Werte für Tübingen (DWD 2018)	115
Tab. 11: Chronologischer Datenbankaufbau im Rahmen der Projektlaufzeit von 2013 -2016 (Manton)	120
Tab. 12: Ausgangsdaten, Datentypen und Verwendung der Daten (eigene Darstellung)	127
Tab. 13: Indikatorenset für Standortbewertung (eigene Darstellung).....	131
Tab. 14: Rangfolgenbildung nach Indikatoren (eigene Darstellung).....	132
Tab. 16: Auflistung der abgeleiteten Kostenfaktoren (eigene Darstellung)	143
Tab. 17: Preisliste der Wärmepumpen nach Leistung (Viessmann 2018).....	144
Tab. 18: Betriebskosten bestehend aus jährlichen Kosten (eigene Darstellung).....	145
Tab. 19: Investitionskosten nach PV-Anlagengrößen (eigene Darstellung)	152
Tab. 20: Faktor €/kWp (F PV inv): Anfangsinvestitionskosten für PV-Anlagen (eigene Darstellung).....	154
Tab. 21: Faktor in %: Investitionskosten (Invest PV area) und Jährliche Betriebskosten (eigene Darstellung) ..	155
Tab. 22: Flächenverfügbarkeit im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung).....	164
Tab. 23: Ergebnis: Gesamtes Energiepotenzial Erdwärme (eigene Darstellung)	187
Tab. 24: Berechnung zur Deckung des Wärmeendenergiebedarfs durch Erdwärme (eigene Darstellung)	188
Tab. 25: Ergebnis: Gesamtes Energiepotenzial Photovoltaik-Strom (eigene Darstellung)	189
Tab. 26: Aufstellung von Energieverbrauch (2015) und -potenzial mit CO ₂ -Emissionen (eigene Darstellung). .	190
Tab. 27: Aufstellung des Stromverbrauchs (2015) und dessen CO ₂ -Emissionen (eigene Darstellung).....	191
Tab. 28: Aufstellung des Wärmeendenergieverbrauchs (2015) und dessen CO ₂ -Emissionen mit weiteren Angaben zur Erdwärmennutzung (eigene Darstellung)	194
Tab. 29: Anfangsinvestitionen und Betriebskosten auf 20 Jahre für Erdwärmesonden (eigene Darstellung) ...	195
Tab. 30: Anfangsinvestitionen und Betriebskosten auf 20 Jahre für PV-Anlagen (eigene Darstellung)	195
Tab. 31: EEG-Umlage und EEG-Einspeisevergütung als Gesamtwerte (eigene Darstellung)	197

Tab. 32: Aufstellung der CO ₂ -Werte nach Energieverbrauch (eigene Darstellung)	198
Tab. 33: Aufstellung der CO ₂ -Werte pro Jahrzehnt des Stufenplans bis 2050 (eigene Darstellung).....	200
Tab. 34: Aufstellung der CO ₂ -Emissionen nach Universität und Universitätsklinikum Tübingen (eigene Darstellung).....	202
Tab. 35: Szenario Campus goes CO ₂₀₃₀	204
Tab. 36: Jährliches Budget für UNI und UKT bis 2050 (eigene Darstellung)	206
Tab. 37: Aufstellung der CO ₂ -Steuersätze für Wärme (eigene Darstellung)	208
Tab. 38: Aufstellung der CO ₂ -Steuersätze für Strom (eigene Darstellung)	208
Tab. 39: Prozentualer Anteil der möglichen CO ₂ -Steuerhöhe an den jährlichen Stromkosten: Vergleich der von Ökostrom und Solarstrom für die Universität Tübingen und Universitätsklinikum (eigene Darstellung)	209
Tab. 40: Prozentualer Anteil der möglichen CO ₂ -Steuerhöhe an den jährlichen Wärmekosten: Vergleich von Fernwärme und Erdwärme für die Universität Tübingen und Universitätsklinikum (eigene Darstellung).....	210
Tab. 41: Vereinfachte Darstellung der Kosten in den Szenarien 1,2,3 (eigene Darstellung)	212

IV. Abkürzungsverzeichnis

ArcGIS	Software ESRI
Area	In dieser Arbeit: Fläche, Flächenbezug
BGF	Bruttogrundfläche
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BNE	Bildung für Nachhaltige Entwicklung
BW	Baden-Württemberg
CAD	Computer Aided Design
CAFM	Computer-Aided-Facility-Management
Cer	Certified Emission Reduction/zertifizierte Emissionsreduktion
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Emission	Kohlenstoffdioxid - Emissionen
CO ₂ t	Kohlenstoffdioxid - Tonnen
CPU	Prozessor
CSR	Corporate Social Responsibility
deENET	Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologie e.V.
DGM	Digitales Geländemodell
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DNK	Deutscher Nachhaltigkeitskodex
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
EAU	European Allowance Unit
ECCP	European Climate Change Programm /Europäisches Programm für Klimawandel
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbaren-Energien-Wärme Gesetz
EEX	European Energy Exchange
EFTAS	European Federation of Financial Analysis Societies
EFNP	Energetischer Flächennutzungsplan
EM	Energiemanagement
EMS	Energiemanagementsystem
EnAG	Energieausweisgesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPBD	Europäische Gebäuderichtlinie
EU	Europäische Union
EU -EHS	Europäisches Emissionshandelssystem
EVI	Elektroverteilung und -installationsnetze
EW	Einwohner
EWS	Erdwärmesonde
FID	Object Identity in ArcGIS

GCP	Global Citizenship
GEG	Gebäude-Energie-Gesetz
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
GIS	Geographische Informationssysteme
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GLT	Gebäudeleittechnik
GtK	Geothermische Kategorie
GWP	Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)
HLRS	Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart
HNO	Hals-Nasen-Ohren-Klinik Tübingen
HUS	Fernwärme-Versorgung
IEA	International Energy Agency
IEKK	Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg
IINAS	Internationale Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien
ILO	International Labour Organization
INGA	Ingenieurgesellschaft für Gebäudeautomation
IPBES	Weltbiodiversitätsrat
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change/ Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen, Weltklimarat
ISO	Internationale Organisation für Normung
ISO	International Organization for Standardization
J	Joule
JCI	Johnson Controls Inc.
Kat.	Kategorie
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
KWEA	Kleinwindenergieanlagen
KWk	Kraft-Wärme-Kopplung
LES	Large Eddy Simulation
LFNB	Leitfaden für Nachhaltiges Bauen
LGRB	Landesanstalt für Rohstoffe, Geologie und Bergbau
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
NAP	National Allocation Plans/Nationale Zuteilungspläne
NE	Nachhaltige Entwicklung
NGF	Nettogrundfläche
NWI	Mathematisch-Naturwissenschaftlicher Campus der Universität Tübingen
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
OID	Object Identification
P	Power/Elektrische Leistung (in kW)
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PEe	Primärenergieverbrauch erneuerbar
PEne	Primärenergieverbrauch nicht erneuerbar
Ppm	Parts per Million
PV	Photovoltaik
RfNE	Rat für Nachhaltige Entwicklung
SDGs	Sustainable Development Goals
SI	Soziale Innovationen
SUP	Strategische Umweltprüfung

tba	Technisches Betriebsamt
TGA	Technische Gebäudeausstattung
THG	Technische Gebäudeausrüstung
THG	Treibhausgas
TRT	Thermal Response Test
TWh	Terrawattstunden
UAV	Unbemanntes Kleinflugzeug MASC - Multi-Purpose Airborne Sensor Carrier
UBA	Umweltbundesamt
UKT	Universitätskliniken Tübingen
UN	Vereinte Nationen (United Nations)
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change/Klimarahmenkonventionen der Vereinten Nationen
UT	Universität Tübingen
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VuB	Vermögen und Bau Baden-Württemberg Amt Tübingen
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
Web	Weltemissionshandelsbank
WIW	Trinkwasser Installations-Netze
WKA	Windkraftanlage
ZDV	Zentrums für Datenverarbeitung
ZEA	Zähler Elektro
ZHF	Zähler Fernwärme
ZWT	Zähler Wasser/ Trinkwasser kalt

V. Einheiten

a	Jahr/year
cm	Zentimeter
°C	Grad Celsius
CO ₂ /m ²	Kohlendioxid pro Quadratmeter
d	Day/Tag
EJ	ExaJoule
EU / € / Euro	Euro
Euro/a	Euro pro Jahr
Euro/kWh	Euro pro Kilowattstunden
Euro/m ²	Euro pro Quadratmeter
GB	Gigabyte
GWh	Gigawattstunden
h	Stunde
Kg	Kilogramm
kg CO ₂	Kilogramm Kohlendioxid
Kg/a	Kilogramm pro Jahr
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWh/m ² /a	Kilowattstunden pro Quadratmeter und pro Jahr
l / L	Liter
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
Mt	Mega tonnen
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
MWh/a	Megawattstunde pro Jahr
t	Tonne/Tonnen
t CO ₂	Tonnen Kohlendioxid
TB	Terrabyte
V	Volumen in m ³
W	Watt

VI. Kurzfassung – Deutsch

Keywords: Nachhaltiges Campuskonzept - Geographische Informationssysteme - Potenzialanalysen - Energiemanagement - Energetischer Flächennutzungsplan – Klimaschutzziele 2030.

Campus goes CO₂₀₃₀ ? Die Ableitung eines modellhaften Umsetzungsplans für die Erreichung der Klimaschutzziele 2030 des Landes Baden-Württembergs am Beispiel des Gebäudebestandes der Universität und des Universitätsklinikums Tübingen.

Mit dem Beschluss der Klimaschutzziele 2030 legte die Landesregierung Baden-Württemberg fest, die Treibhausgase bis ins Jahr 2050 um 90 % zu reduzieren. Parallel dazu ist der landeseigene Gebäudebestand bis 2030 klimaneutral zu gestalten. Danach soll die Installation von Photovoltaik auf landeseigenen Dachflächen sowie die Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erhöht, der Primärenergieverbrauch gesenkt und der Ausbau und die Nutzung erneuerbarer Energien stark gefördert werden. In dieser Dissertation werden Flächen nach ihrem erneuerbaren Energiepotenzial analysiert und die Kosten für ihre Nutzung kalkuliert. Dabei werden CO₂-Bewertungen aufgestellt, die die untersuchten Flächen nach ihrem CO₂-Kompensationswert bewerten. Der Gebäudebestand der Universität Tübingen wird beispielhaft herangezogen, um daran eine stufenweise Umsetzung der Klimaschutzziele zu simulieren. Die Flächen werden nach gewichteten Indikatoren in Rangfolgen abgebildet:

- **Indikator 1a – Energieertrag (kWh/m²) – Gewichtung 60 %**
absteigend nach höchstem Jahresertrag (aus Energiepotenzial pro m²).
- **Indikator 2a - Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh) – Gewichtung 30 %**
aufsteigend nach geringstem Kilowattpreis (aus Gesamtkosten und Energieertrag).
- **Indikator 3a – CO₂-Werte (CO₂/m²) – Gewichtung 10 %**
aufsteigend nach geringstem CO₂-Wert (aus Energieertrag und CO₂-Äquivalent).

Der Gebäudebestand der Universität und des Klinikums besitzen unterschiedliche Standortbedingungen für den Ausbau von Photovoltaik und Erdwärme. Die Eignung der Flächen wird in gebildeten Rangfolgen ausgewiesen. Die Standorte mit besten Bedingungen werden als ***Tübingens next top places für renewables*** vorgeschlagen. Welchen Beitrag die Nutzung der untersuchten Flächen für die Erreichung der Klimaschutzziele 2030 leisten kann, wird als mögliche CO₂-Kompensation ausgewiesen. In empirischen Szenarien werden unterschiedliche Umsetzungsmöglichkeiten zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030 durchgespielt, der Aufschluss über die Komplexität der bevorstehenden Herausforderungen geben. Der finanzielle Aufwand, strukturelle Veränderungen und Anpassung des Verhaltens sind in einem engen Zeitplan zu bewältigen. Dies setzt voraus, dass die erforderlichen Daten bereits in ein geeignetes Datensystem integriert sind, Entscheidungen rasch getroffen werden können und Synergien geschaffen werden. Von großer Bedeutung ist die aktive Verknüpfung von Angewandten Wissenschaften und Verwaltung. Hier wurde aus der Perspektive der Geographie mithilfe geographischer Informationssysteme eine Flächenbewertung durchgeführt, die den Blick auf die energetische Flächennutzung lenken möchte und für zukünftige Flächennutzungsplanungen, die Ausweisung eines energetischen Flächennutzungsplans (E-FNP) vorschlägt.

VII. Abstract – English

Keywords: Sustainable campus concept - Geographical information systems - Potential analyses -Energy management - energetic land use plan - Climate protection goals 2030.

Campus goes CO₂₀₃₀ ? The derivation of a model implementation plan for achieving the 2030 climate protection goals of the state of Baden-Württemberg using the example of the building stock of the university and the university hospital in Tübingen.

With the resolution of the climate protection targets 2030, the state government of Baden-Württemberg determined to reduce greenhouse gases by 90 % by the year 2050. At the same time, the state administration decided to make its state-owned building stock climate-neutral by 2030. Accordingly, the installation of photovoltaics on state-owned roofs and the use of combined heat and power (CHP) are to be increased, primary energy consumption is to be reduced and the expansion and use of renewable energies is to be strongly promoted. In this dissertation, areas are analysed according to their renewable energy potential and the costs for their use are calculated. In the process, CO₂ valuations are drawn up, which evaluate the examined areas according to their CO₂ compensation value. The building stock of the University of Tübingen is used as an example to simulate a step-by-step implementation of the climate protection goals. The areas are ranked according to weighted indicators:

- **Indicator 1a - Energy yield (kWh/m²) - weighting 60 %.**
descending order of highest annual yield (from energy potential per m²).
- **Indicator 2a - price per energy unit (Euro/kWh) - weighting 30 %**
ascending by lowest price per kilowatt (from total costs and energy yield).
- **Indicator 3a - CO₂ values (CO₂ /m²) - weighting 10 %**
ascending by lowest CO₂ value (from energy yield and CO₂ equivalent).

The building stock of the university and the hospital have different site conditions for the expansion of photovoltaics and geothermal energy. The suitability of the sites is shown in formed rankings. The sites with the best conditions are proposed as ***Tübingen's next top places for renewables***. The contribution that the use of the investigated areas can make to achieving the 2030 climate protection targets is presented as CO₂ compensation. In empirical scenarios, different implementation options for achieving the 2030 climate protection goals are played out, which provide information about the complexity of the upcoming challenges. The financial effort, structural changes and adaptation of behaviour have to be mastered within a tight time schedule. This requires that the necessary data are already integrated into a suitable data system, that decisions can be made quickly and that synergies are created. Of great importance is the active linking of applied sciences and administration. Here, from the perspective of geography, an area assessment was carried out with the help of geographical information systems, which aims to direct attention to energy-related land use (E-FNP) and proposes the designation of an energy-related land use plan for future land use planning.

1. Einleitung

Die globalen Klimaschutzziele sind häufig Thema in den aktuellen Nachrichten. Die Bevölkerung ist besorgt über zukünftige Lebensbedingungen durch den bereits spürbaren Klimawandel. Die Veränderungen werden gravierend bezeichnet, sodass ein Leben wie bisher, kaum weiterhin möglich erscheint. Die Zeitspanne, in der sich die vorhergesagte Klimaerwärmung ereignen wird, ist überschaubar. Ein paar Jahrzehnte werden ausreichen, um die klimatischen Veränderungen in vollem Umfang zu erleben. In den Medien werden Szenarien gezeigt, wie die Auswirkungen der Klimaerwärmung noch zu bewältigen wären - theoretisch. Dies erzeugt Hoffnungen und Ängste, die sich deutlich in Handlungsforderungen und Demonstrationen der Bevölkerung zeigen. Zeitgleich ist es die Bevölkerung, von der Verhaltens- und Konsumänderungen vorzunehmen sind.

Der Klimawandel wird unter anderem durch den Treibhausgaseneffekt verursacht. Ein hoher Verbrauch fossiler Brennstoffe für den Energiebedarf und die Mobilität erzeugen einen hohen CO₂-Ausstoß, der durch erneuerbare Energien gesenkt werden kann. Die politische Diskussion dreht sich um die zukünftige Energieversorgung ohne fossile Brennstoffe, da die Rohstoffknappheit und der Krieg in der Ukraine die Energiepreise aktuell stark ansteigen lassen. Hinzu kommen zusätzliche CO₂-Besteuern, die Investitionen in alternative Energiesysteme lenken.

Die Europäische Kommission untersuchte die Möglichkeiten, einer umweltschonenden und energieeffizienten europäischen Wirtschaft und legte für die EU-Staaten einen kosteneffizienten Fahrplan fest, der bis ins Jahr 2050 eine Treibhausgasreduzierung von 80-95 % gegenüber dem Wert des Jahr 1990 verspricht. In Etappenzielen sollen dabei bis 2030 mindestens 40-55 % und bis ins Jahr 2040 mindestens 60 % der Treibhausgase reduziert werden. Bis 2050 will die EU klimaneutral sein. Wichtig dabei ist eine Verringerung der Emissionen in der Europäischen Union (EU) durch jeweils nationale Emissionsreduktion. Dafür sind Investitionen in notwendige Maßnahmen und Techniken essentiell, sodass alle Wirtschaftszweige gleichermaßen einen Beitrag an der gemeinsamen Treibhausgasreduzierung leisten. Im Rahmen dieses langfristigen Ziels soll der gesamte Endenergieverbrauch zu 40 % aus erneuerbaren Energien gedeckt werden und der Primärenergieverbrauch soll um 39 % sinken (EU KOM, 2018). Die Strategie zur europaweiten Reduzierung der Treibhausgase wird auf alle Einzelstaaten übertragen.

Parallel zur EU-weiten Strategie veröffentlichte die Bundesregierung nationale Klimaschutzziele, um bis zum Jahr 2050 ein klimaneutraler EU-Staat zu werden (Klimaschutzlangfriststrategie 2020). Ergänzend dazu hat die Bundesregierung sektorale Ziele für die Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr und die Landwirtschaft festgelegt. Im Sektor Energiewirtschaft sind danach bis 2050 insgesamt 466 Mio. t CO₂ - Äquivalente einzusparen (BMUV 2020). Für die landeseigenen Gebäude gelten noch ambitioniertere Ziele. Denn das Klimaschutzgesetz (KSG BW) legte den gesetzlichen Rahmen für den staatlichen Gebäudebestand und die kommunalen Landesverbände fest: bis 2030 sollen die Landesbauten klimaneutral sein.

Geht man davon aus, dass die Klimaschutzziele im selben Verhältnis für groß- und kleinräumliche Verursacher gelten, so können diese Zielvorgaben prinzipiell auf kleinräumige Einheiten wie beispielsweise einzelne Institutionen heruntergebrochen und prozentual übertragen werden. Die Auseinandersetzung mit der Erreichung der Klimaschutzziele ist deshalb auch Aufgabe einzelner Institutionen - oder einer Universität. Es geht weitläufig um den Landeshaushalt und dessen bestmögliche Nutzung für den Erhalt eines immer

stärker von Inhalten des nachhaltigen Klimaschutzes geprägten Bildungssystems in Baden-Württemberg. Diese Tatsache spielt für die Bildung allgemein eine wichtige Rolle. Denn *Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE)* ist ein zentraler Bestandteil des Lehrplans geworden. Dazu gehört auch, dass Bildungseinrichtungen parallel zur Umgestaltung des Lehrplans einen eigenen ressourcenschonenden Umgang einführen, der nach den Vorgaben eines Nachhaltigkeitsmanagements fungiert.

Um den Aufgaben aus Klimaschutz und Nachhaltigkeit gerecht zu werden, sind innerhalb der Universitäten bürokratische Transformationsprozesse freigesetzt worden, indem neue Strukturen für neue Zuständigkeiten entstehen. Diese können flexibler auf die Herausforderungen des Transformationsprozesses reagieren. Die Ebenen übergreifende Zusammenarbeit innerhalb der Verwaltungsapparate von Universitäten basiert auf einer zunehmenden Flexibilität, um die neuen Anforderungen zu adaptieren. Diese internen Transformationsprozesse tragen in hohem Maße dazu bei, dass Maßnahmen umsetzbar werden und ein nachhaltiger Effekt auf interne Umstrukturierungen entsteht. Synergien und Kompetenzbündelung aus Forschung, Wissenschaft und Verwaltung können eine Form der internen Unternehmensberatung anbieten. In dieser Dissertation werden die Möglichkeiten beleuchtet, die sich aus Potenzialanalysen für erneuerbare Energien bieten, um der Erreichung der Klimaschutzziele 2030 zuzuarbeiten.

Das Kooperationsprojekt „Innovatives Energie- und Umweltkonzept für die Gebäude des Universitätsklinikums und der Universität Tübingen“ wurde geleitet von Prof. Dr. Volker Hochschild, Lehrstuhl für Physische Geographie und Geoinformatik; Prof. Dr. Jens Bange, Lehrstuhl für Umweltphysik und Dipl.-Ing. Jürgen Bunzel, Bereichsleiter des Technischen Betriebsamtes (tba) des Universitätsklinikums Tübingen. Zusammen wurde mit dreijähriger Förderung durch den Innovations- und Qualitätsfonds (Förderrunde 2012) des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst (MWK) des Landes Baden-Württembergs das Projekt bearbeitet. Im ersten Schritt wurden Potenzialanalysen für die erneuerbaren Energie Photovoltaik und oberflächennahe Geothermie und urbane Windkraft simuliert. Eine flächendeckende Einschätzung des nutzbaren Potenzials wurde dem Strom- und Wärmeverbrauch gegenübergestellt und das Verhältnis zwischen Potenzial und Verbrauch aufgestellt. Das Ergebnis des Projekts stellte eine Energiebewertungsmatrix dar, die alle Gebäude der Universität nach ihrem erneuerbaren Energiepotenzial bewertet¹ und während der Projektlaufzeit veröffentlicht. Dabei wurde ein Forschungsdefizit im Bereich hochauflösender Simulationen festgestellt, das den hohen Arbeitsaufwand rechtfertigte und weiterführende Betrachtungen im Untersuchungsgebiet ermöglichte. Inzwischen wurden vertiefende Untersuchungen im Rahmen von Qualifizierungsarbeiten und Folgeprojekten durchgeführt². In der vorliegenden Dissertation wurde diese Datengrundlage für weiterführende Auswertungen genutzt.

Die neu entwickelte Datenbank beinhaltet weiterführende Berechnungen pro Flächeneinheit. Als Forschungsergebnis wird die **Ausweisung des Flächenwertes nach Energiepotenzial, CO₂-Werten und nach Kostenaufwendungen** ausgewiesen. Diese Arbeit möchte auch zu einem neuen energetischen Flächennutzungsplan (**E-FNP**) anregen und fasst innovative Ansätze zusammen, um ein neues Modell der Flächenbewertung vorzustellen.

¹ Abschlussbericht des Kooperationsprojekts „Innovatives Energie- und Umweltkonzept für die Gebäude des Universitätsklinikums und der Universität Tübingen“, gefördert durch den Struktur- und Qualitätsfond (IQF) des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst (MWK) Förderlinie 2012, Projektpartner: Volker Hochschild, Jürgen Bunzel, Jens Bange.

² Manton S.-Chr., Bunzel, J., Hager, K., Lehmann, S., Stängel, M., & Hochschild, V. (2012), Manton, S.-Chr. & V. Hochschild, T. Potthast (2016), Manton (2017), Manton (2018).

2. Struktur und Zielsetzung

Zu Beginn wird der strukturelle Aufbau und die Zielsetzung dieser Dissertation vorgestellt. Anschließend wird ein interdisziplinärer Forschungsstand zusammengefasst. Das Forschungsdefizit wird anhand einzelner Forschungsfragen abgeleitet.

Im Interdisziplinären **Forschungsstand (Kap. 3)** sind wissenschaftliche Diskussionen der Nachbardisziplinen aufgeführt, die das Thema dieser Arbeit berühren. Zu Beginn wird das Dissertationsthema in der **Geographie** eingeordnet und innovative Methoden der Flächenbewertung vorgestellt, die die Klimaschutzrelevanz der Flächennutzung mitberücksichtigen. Die Raumplanung hat zukünftig Flächen für erneuerbare Energie miteinzuplanen³.

Die **Geographie der Energien** hat als junger Fachbereich innerhalb der Geographie den Forschungsbereich *GIScience and Energies* hervorgebracht. Die Methodenvielfalt geographischer Informationssysteme (GIS) gewann an Bedeutung (Kap. 3.1).

Die **Geoinformatik** bietet Methoden für flächendeckende Berechnungen, die in den Potenzialanalysen für Photovoltaik und oberflächennahe Geothermie Anwendung finden. Anschließend werden technische Berechnungen für die Anlagenkonfiguration von **erneuerbaren Energien** vorgestellt. Dabei wird der Blick auf das erneuerbare Energiepotenzial und das darin begründete CO₂-Reduktionspotenzial gerichtet, die eine besondere Rolle für die Energiewende und die Klimaschutzziele einnehmen.

Um den Beitrag erneuerbarer Energien zum Klimaschutz darzustellen, wird im Forschungsstand auf die globale und nationale Verankerung der Klimaschutzziele eingegangen (Kap. 3.2.1). Auf Bundesebene festgelegte Leitfäden und Bewertungssysteme für nachhaltiges Gebäude- und Energiemanagement wurden auf Landesebene übertragen und beispielhaft auf das Untersuchungsgebiet angewendet (Kap. 3.2.4).

Der finanzielle Förderrahmen für energetische Sanierungen wird anhand aktueller Statistiken vorgestellt (Kap. 3.2.5). Dabei kommen Fragen in Bezug auf die Effizienz von Anreizsystemen, Förderungen und Instrumenten auf, aus denen sich Begründungen für eine CO₂-Bepreisung ableiten (Kap. 3.3). Das Emissionshandelssystem, die Bestimmung der CO₂-Äquivalente von GEMIS (4.93) und die gesetzlich verankerte CO₂-Besteuerung werden vorgestellt (Kap. 3.3.5 - 3.3.7). Die Entwicklung des Ausbaus erneuerbare Energien und die angestrebte Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen wird an aktuellen Zahlen Baden-Württembergs dargestellt (Kap. 3.3.3 + 3.4.2). Daran ist sichtbar, in welchem Umfang weiterhin Maßnahmen zu ergreifen sind, um auf landeseigenen Gebäuden und Grundstücken erneuerbaren Strom und Wärme zu erzeugen und selbst zu nutzen. Verschärfte gesetzliche Grundlagen und optimierte Monitoring-Instrumente werden vorgestellt und im Kontext ihrer Wirksamkeit für die Erreichung der Klimaschutzziele abgewogen (Kap. 3.4.4).

Es werden Forschungsnetzwerke vorgestellt (Kap. 3.5), die sich im interdisziplinären Austausch mit Fragen zur Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE) (Kap. 3.5.2), Nachhaltigkeit und Klimaneutralität von Bildungseinrichtungen befassen. In Verbindung mit ihrer Verantwortung in der Ausbildung neuer Entscheidungsträger stehen Universitäten in der Pflicht, mit gutem Beispiel voranzugehen und Lösungen zu finden (Kap. 3.5.3). Dies schließt den Kreis zwischen den *Top-Down Maßnahmen* aus Zielvorgaben und

³ FONA 2021, Quelle BMBF- Förderprogramme „Grüne Stadt der Zukunft“.

Gesetzen auf Bundes- und Landesebene zu den *Bottom-up-Bewegungen* aus Studierenden-Initiativen wie *sneep e.V.* und *Fridays of Future*. Denn die Forderungen zu einem Strukturwandel treffen von beiden Seiten auf die Bildungseinrichtungen.

Die **Verankerung der Klimaschutzziele des Landes Baden-Württembergs** und die Handlungsstrategien der Landesverwaltung des staatlichen Hochbaus werden vorgestellt. Dabei wird die Ermittlung der CO₂-Emissionen mithilfe der geltenden CO₂-Äquivalente gezeigt und die aktuelle Debatte um eine CO₂-Bepreisung erörtert. Anschließend wird die Bedeutung eines effizienten und nachhaltigen Energie- und Umweltmanagements vorgestellt. Die gesetzlichen Vorgaben des **Gebäude-Energie-Gesetzes (2021)** löste die geltenden **Energieeinsparverordnungen (EnEV)** ab und gibt Energiestandards vor, die für Neubauten und Bestandsgebäude einzuhalten sind. Mit den geltenden Gesetzesgrundlagen für die Modernisierung und Sanierung von Bestandsgebäuden ist die Umsetzungsstrategie für die Klimaschutzziele im Gebäudesektor verknüpft.

Wie den Veröffentlichungen von HOCH N (2018) zu entnehmen ist, sind aktuelle Forschungen an **Nachhaltiger Entwicklung** (NE) auszurichten. Deshalb orientiert sich diese Arbeit daran, fachliche Schnittstellen zu Nachhaltigkeitsforschung herauszuarbeiten und in die Methodik mitaufzunehmen. Als nachhaltige Kompetenzen gelten Kenntnisse in **Ethik und Normativität** sowie die **Fähigkeit zur Führung zivilgesellschaftlicher Diskurse**, durch die eine wachsende Toleranz gegenüber Transformationen und Change-Management unterstützt wird.

Das **Forschungsdefizit** wird in **Kapitel 4** abgeleitet. Das abgeleitete Forschungsdefizit (Kap. 4) und der Forschungsbedarf in dieser Arbeit gründen sich auf mögliche Lösungsansätze interdisziplinärer Forschungsfragen, die durch diese Methode der Flächenbewertung zu einem stufenweisen Umsetzungsplan für den Ausbau erneuerbarer Energien auf den landeseigenen Flächen führen (Kap. 6). Vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele 2030, dem Sanierungsbedarf im staatlichen Hochbau, dem angestrebten Ausbau erneuerbarer Energien und der Reduzierung von CO₂-Emissionen, drohen Zusatz- und Folgekosten für nicht erreichte Klimaschutzziele. Daraus entsteht ein enormer Zeitdruck für die Umsetzung von Energie und CO₂ einsparenden Maßnahmen. In dieser Arbeit wird das **Forschungsdefizit in den nicht vorhandenen bzw. nicht mitgelieferten Umsetzungsplänen** für die Klimaschutzziele des Landes Baden-Württembergs **gesehen**, die für die Zielerreichung essentiell sind. Aus diesem Grund werden auch Szenarien am Beispiel des Gebäudebestandes der Universität und des Universitätsklinikums Tübingen empirisch aufgestellt und in Verbindung mit einem **energetischen Flächennutzungsplan (E-FNP)** – gis-basiert dargestellt.

Das **Untersuchungsgebiet – die Universität und das Universitätsklinikum Tübingen** – wird in **(Kapitel 5)** vorgestellt: die klimatischen und geologischen Gegebenheiten und der Gebäudebestand sind anhand von Laserscanndaten mithilfe geographischer Informationssysteme bearbeitet und auf ihr erneuerbares Energiepotenzial untersucht. Für Solaranlagen und geothermische Anlagen werden die Rahmenbedingungen vorgestellt.

In **Kapitel 6** sind die **Methoden der Flächenbewertung** in einzelnen Schritten wiedergegeben, um durch Transparenz die Qualität der Ergebnisse nachvollziehbar darzustellen. Dafür sind zusätzliche Beschreibungen und die angewendeten Formeln in den **Berechnungstabellen, sowie Wertetabellen** mit

Ergebnissen, die in ArcGIS (ESRI) importiert und im Kartenmaterial weiterbearbeitet wurden, im digitalen Anhang hinterlegt (s. Digitaler Anhang):

- Die **Ableitung von Indikatoren für die Flächenbewertung (Kap. 6.1)** ergab sich aus der Standorteigenschaften, der technischen Anlagenkonfiguration für Photovoltaik und Erdwärme (**Kap. 6.4. und 6.5.**) und der CO₂-Bestimmung. Hierfür sind Berechnungsmethoden erprobt und mit Fachexperten erörtert⁴ worden, die flächendeckend anwendbar sind.
- Die **Datengrundlage (Kap. 6.2.)** bilden die Potenzialanalysen des vorangegangenen Projekts (Geodaten, Laserscandaten) und Attributdaten (gebäudespezifische Verbrauchs- und Kostenwerte). Die neue Datenbank dieser Dissertation wurde durch die Entnahme einzelner Datensätze und deren Verknüpfung mithilfe von Schlüsselkennzahlen (Keycodes) aufgebaut. Vorgaben zur Vertraulichkeit von internen Daten sind berücksichtigt.
- Die **CO₂-Berechnungen (Kap. 6.6.)** werden mit den herangezogenen CO₂-Äquivalenten (GEMIS 4.93) durchgeführt, um daraus die jeweiligen CO₂-Emissionswerte zu berechnen sowie die dazugehörigen Kosten zu kalkulieren.

Im **Kapitel 7: Vorstellung und Interpretation der Ergebnisse** wird die Verteilung der Daten nach einzelnen Kennzahlen, die Klassifizierung und Rangfolgenbildung nach gewichteten Indikatoren (**Kap.7.1 - 7.4.**) vorgestellt. Die Verteilung der Ergebnisse innerhalb des finalen Datensatzes sind in Histogrammen, Übersichts- und Vergleichskarten visualisiert (s. Anhang). Anschließend wird die **Darstellung der Gesamtergebnisse (Kap. 7.6)** aufgeführt und interpretiert. Dazu werden die Energiepotenziale, die Energieverbräuche auf ihrem Deckungsgrad untersucht und die verursachten CO₂-Emissionen des Strom- und Energieverbrauchs den vorhandenen CO₂-senkenden Potenzialen der erneuerbaren Energien gegenübergestellt.

Die Ableitung von Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen spielt eine wesentliche Rolle auf dem Weg zu einer nachhaltigen und - *bestenfalls* - **klimateutralen Universität bis 2030**. Hierfür werden in einem empirischen Planspiel einzelne Szenarien **Campus goes CO₂2023 (Kap. 7.7.4.)** mit verschiedenen Stufenplänen aufgestellt (**Kap. 7.7.**). Die daraus resultierende geographische Flächenbewertung ist zugleich Grundlage für die Ableitung eines zeitlichen **energetischen Flächennutzungsplans (E-FNP) (KAP. 7.7.6)**, der sich anhand der Flächenbewertung und Standortempfehlung „**Tübingens next TOP places for renewables**“ (**Kap. 7.3 + 7.5.**) ableitet.

In der **Zusammenfassung (Kap. 8)** sind die einzelnen Schritte und Ergebnisse dieser Arbeit nochmals erwähnt und werden in der **Diskussion (Kap. 9)** erörtert. Die Qualität der Ergebnisse, deren möglicher Nutzung und die Implementierung in ein universitäres Klimaschutzkonzept 2030 werden kritisch betrachtet. Dafür ist eine stetige Anpassung des Leitbildes, einer Nachhaltigkeitsstrategie mit konkreten Nachhaltigkeitszielen notwendig und dem darin enthaltenen **Potenzial für Exzellenz**.

Einen **Ausblick** bietet **Kapitel 10** an, indem Möglichkeiten der Projekterweiterung und der universitätsinternen Zusammenarbeit benannt werden. Es wird **ein Synergie fördernder – interdisziplinärer**

⁴ Expertengespräche mit Prof. Dr. Martin Brunotte, Hochschule Rottenburg, Dr. Jakob Sierig, Geschäftsführer Firma RUOFFF, Reutlingen, Dipl.-Ing. Jürgen Weinmann, Vertriebs- und Projektberatung VIESSMANN (s. Literaturverzeichnis).

Sonderforschungsbereich *Campus goes CO₂₀₃₀* – der angewandten Wissenschaften zur Unterstützung der großen Herausforderung vorgeschlagen.

Der **Anhang (Kap. 11)** beinhaltet die Dokumentation der Datensätze mit Screenshots, die tabellarische Beschreibung der Rechenwege sowie die Basisdaten (Geo -und Attributdaten) das erstellte GIS-Projekt (ARCMAP/ESRI mit Shape-files, Keycodes und Ergebniskarten .jpeg, .pdf) sowie die digitale Literaturdatenbank und weiterführende Informationen, Leitfäden und Referenzdokumente, die sich während der Bearbeitung als besonders nennenswert erwiesen, sind beigefügt.

Zielsetzung

Die Klimaschutzziele 2030 für landeseigene Gebäude in Baden-Württemberg werden in dieser Arbeit beispielhaft auf den Gebäudebestand der Universität Tübingen und des Universitätsklinikum übertragen und modellhaft in einem Szenarium dargestellt, welche Flächen durch ihr erneuerbares Energiepotenzial effizient zur Klimaneutralität der Universität Tübingen beitragen können. Dies geschieht unabhängig von der Bewertung des Energieverbrauchs im Untersuchungsgebiet *Universität Tübingen*, um potenzielle Flächen für eine CO₂-arme Energiegewinnung mit Hilfe von geographischen Informationssystemen (GIS) zu visualisieren.

Die Ergebnisse sollen aufzeigen, welchen Beitrag die Untersuchungsflächen bei der Erreichung der Klimaschutzziele leisten können, was eine Nutzung kosten würde und welche CO₂-Bewertung daraus resultiert, wenn sie nach unterschiedlichen Bewertungskriterien betrachtet werden. Mithilfe verschiedener Szenarien, Stufenplänen und der Ableitung eines energetischen Flächennutzungsplans (E-FNP) werden diese Möglichkeiten simuliert, die mit dem Potenzial zur Verfügung stehen, um die Klimaschutzziele 2030 zu erreichen. Das Ziel dieser Arbeit stellt dieses empirische Planspiel anhand konkreter Standortbewertungen dar.

3. Interdisziplinärer Forschungsstand

Da sich die Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit aus verschiedenen Fragen zusammensetzt, ist die Vorstellung eines interdisziplinären Forschungsstandes sinnvoll. Bezugnehmend darauf wird die Arbeit zunächst innerhalb der Fachdisziplin Geographie eingeordnet.

3.1. Geographie der Energien - Energiegeographie

Die *Geographie der Energien* stützt sich seit etwa 50 Jahren auf eine breite internationale wissenschaftliche Literatur. Zu den bedeutendsten Veröffentlichungen bezüglich Definition und Wirkungsbereich der *Geographie der Energien* zählen *The Geograph Of Energy* von G. MANNERS (1964), *Energy In The Perspective Of Geography* von N. B. GUYOL (1971) und *Geography Of Energy* von WAGSTAFS (1974), sowie *Man, Energy, Society* von POTTER & COOK (1977). In den Jahren 1950 bis 2000 entstanden klassische Grundlagenwerke zur *Geographie der Energien* von PRATT et al. (1950), ODELL (1986), OKE (1988). International entstanden regionale Klassiker zu Russland (RADETZKI 1994), zu China und Globalem Wandel (KUBY 1995) zu den Vereinigten Staaten von Amerika (NYE 1990, NYE 1999) und zu Europa (HOFFMANN 1985). Mit zunehmender Bedeutung wurde seit der Jahrtausendwende verstärkt in der *Geographie der Energien* geforscht und Werke zur aktuellen Situation in einem globalen Kontext veröffentlicht (SMIL 2000, CHEVALIER 2009, KNIGHT 2010).

Mittlerweile ist die *Energiegeographie*, - wie sie erstmals von BRÜCHER (2009), genannt wurde, einer breiteren Forschergruppe zugänglich gemacht, wodurch sich - aus geographischen Gesichtspunkten - ein sehr diversifiziertes Forschungsfeld erschließt. Im Modell der Energie-Prozesskette stellte BRÜCHER (2009), BRÜCHER (2010) dar, dass der Energiefluss das geeignete Substitut für die Darstellung energiegeographischer Aspekte ist, da es die Größen *Umwandlung*, *Verteilung* und *Verbrauch* von Energie darstellt. Heute ist die *Energiegeographie* durch die Werke von BRÜHNE (2009), QUASCHNING (1998), QUASCHNING (2021), RICH (1994), RICH (2000), SMIL (2013) als eigener Forschungsbereich innerhalb der Geographie etabliert.

Dem Forschungszweig *Geographie der Energien* kommt auch die Aufgabe zu, Nachfrage und Angebot gegeneinander abzuwägen (PASQUALETTI, 2011; PASQUALETTI, 2013). Allerdings wird die Exploration klassischer Rohstoffe wie Erdöl und Erdgas, zur Entdeckung weiterer Rohstoffvorkommen dem Aufgabenfeld der Geologie zugeordnet. Wobei die fachliche Schnittstelle zwischen Geologie und Geographie in der Standortfrage verortet ist: die Bewertung von Standorten nach erneuerbaren Energien, Untersuchungen von Abbaugebieten für natürliche Ressourcen, den verursachten Umweltschäden und den wirtschaftlichen Auswirkungen für Industrieländer, fallen in das Forschungsgebiet der Geographie.

Die *Geographie der erneuerbaren Energien* konzentriert sich auf Untersuchungsmethoden an der Oberfläche wie z.B. Windvorkommen, Sonneneinstrahlung, Hangneigung und Expositionen - ausgenommen der Erdwärme. Hierzu sind ebenfalls Veröffentlichungen von QUASCHNING (1998) QUASCHNING (2015), QUASCHNING (2021), GOODCHILD, (2018), KLÄRLE (2007), KLÄRLE (2011), KLÄRLE (2012), KLÄRLE (2019) essentiell. Die Ursachenanalyse des Klimawandels macht deutlich, dass vielen negativen Auswirkungen durch den Einsatz erneuerbarer Energien entgegengewirkt werden kann. Besonders innovative urbane Entwicklungskonzepte für die Versorgung durch erneuerbare Energien wurden von DROEGE (2006), Droege (2014), DROEGE & KNIELING (2017), DROEGE (2020) veröffentlicht. Die wachsende Bedeutung erneuerbarer Energiesystemen zeigt den technischen Fortschritt, der die beschlossene Energiewende forciert.

Klassische raumplanerische Fragen werden der *Angewandten Geographie* zugeordnet. Darunter fallen z.B. Planungen von Stromtrassen und -netzen. Die *Geographie der erneuerbaren Energien* befasst sich mit Standortanalysen, Energiepotenzialen, den räumlichen Energiespeichermöglichkeiten und strategischen Anlagenstandorten. Die Forschungen zu Biomasse werden auch der *Agrargeographie* zugeordnet, womit weitere fachliche Schnittstellen zu den Forst- und Agrarwissenschaften eröffnet werden (siehe BRUNOTTE 2010).

3.1.1. Die Klimarelevanz des Raumes

Die Klimaschutzziele und die Energiewende verlangen dem Raum in Zukunft eine weitere Funktion ab und richten die aktuelle Diskussion in der Geographie auf neue Flächenbewertungen. Flächen für erneuerbare Energie ermöglichen eine autarke Energiegewinnung, die sich schonend auf das Klima auswirken⁵.

Der Diskurs zu Klimawandel und der Entwicklung von Klimaanpassungsstrategien strebt die Findung eines gemeinsamen Verständnisses an, da unterschiedliche energie- und klimapolitische Strategien sehr diverse Stadtentwicklungskonzepte hervorbringen. Dabei ist die Zusammenführung überindividueller Denkmuster besonders wichtig. Auch die zunehmende CO₂-Belastung in Städten führt zu neuen Quartiers- und Stadtentwicklungskonzepten und bewertet Standorte neuerdings nach ihrer Klimawirkung. In Stadtplanungsstrategien werden Standorte und Gebäude davon bewertet, um den Raum energieeffizient und Klimawandelgerecht zu gestalten (STURM & MATTISSEK 2018:113).

Der Bedarf an Aufklärung, Dialogen und Diskussionen zeigt das Konfliktpotenzial auf und bietet neue Forschungsbereiche. KÜHNE (2018) unterscheidet Konflikttheorien zu Raumkonflikten und stellt die Entwicklung unterschiedlicher Konflikttheorien vor, die ursprünglich aus territorialherrschaftlichen Ansprüchen über Gebiete entstanden und sich zu sozialen Konflikten entwickeln können. Gemeinsame Raumnutzungen sprechen auch für gleiche Gesinnungen unter den Raumnutzenden. So entstehen Raum- und Landschaftskonflikte durch unterschiedliche Auffassungen darüber, welche *Lebenschancen* der Raum den Nutzenden bieten kann (abgeleitet von KÜHNE 2018b:167). Denn unterschiedliche Vorstellungen über die Gestaltung einer Landschaft - eines Lebensraumes, zeigen sich in der Entstehung von Lebenschancen-Konzepten. Das darin liegende Potenzial zur Erweiterung der Lebenschancen betrifft ganz individuelle, gesellschaftliche und generationenübergreifende Vorstellungen über Lebenschancen-Konzepte. Daran knüpft der Diskurs über Energiekonzepte an und wirft die zentrale Frage auf, ob der Ausbau der erneuerbaren Energien einer „verwerflichen Heimatzerstörung“ gleichkommt und/oder die „Klimazerstörung für künftige Generationen“ verhindern kann (abgeleitet von KÜHNE 2018b:170ff).

Die energiepolitischen Konflikte, die sich aus dem Bau von Energieanlagen ergeben, weisen hohe Diversität auf. Obwohl sie energiewirtschaftlich als Gelegenheit für konstruktive (und ganzheitliche) Aushandlungen bieten, um die künftige Energieversorgung zu gewährleisten, werden sie meist für energiepolitische Profilierungen benutzt. BECKER & NAUMANN (2018) unterscheiden zwischen *Typen, Konstellationen und Dimensionen* der Energiekonflikte und unterteilen in Verteilungs-, Verfahrens-, Standort- und Landnutzungskonflikte sowie in Identitäts- und Energieträgerkonflikte. Je nach Positionierung der Beteiligten und Akteure wird weiter differenziert, um die Auswirkungen von Energiekonflikten zu

⁵ FONA 2021, Quelle BMBF- Förderprogramme „Grüne Stadt der Zukunft“

analysieren. Sie reichen weit in gesellschaftliche und planungspolitische Konflikte hinein und verschärfen diese (BECKER & NAUMANN 2018:512ff).

Die Klimaanpassung erfordert Resilienz, so kreisen aktuelle Forschungsfragen der Stadtgeographie um die Resilienzfähigkeit der Städte von Morgen. Newman et al. (2010) definierte resilient-mitigative Stadtentwicklung als praxisorientierten Ansatz, wobei eine Stadt durch die Verbesserung des Gebäudezustandes und der Verkehrsinfrastruktur energieeffizienter und umweltfreundlicher wird. Prasad et al. (2009) bezeichnete mit dem Ansatz resilient-adaptiv die Städte, die sich in der Planung am Klimawandel und seinen Auswirkungen ausrichten und mit entsprechenden Gesetzen und Planungsvorgaben dem entgegensteuern und aktive Initiativen hervorbringen (Climate Resilient Cities). Das International Council for Local Initiatives (IC-LEI) veröffentlichte 2011 einen resilient-organisatorischen Ansatz: *Towards Urban Resilience* steht für ein Steuerungssystem für Risikoerkennung und Handlungsstrategien, die im Katastrophenfall angewendet werden und die Organisation von Funktionsausfällen wie Notfallprogrammen und Katastrophenmanagement beinhalten (IC-LEI, 2011).

Die Auswirkungen des Klimawandels werden sichtbar und erfordern interdisziplinäre Forschungen. Parallel dazu wird der Ausbau der erneuerbaren Energien forciert. Der Klimawandel fördert die Erarbeitung komplexer Energieversorgungskonzepte als Teil von Klimaanpassungsstrategien. Nach DROEGE (2014) hängen hier Resilienz und Energieautarkie unweigerlich zusammen und voneinander ab. Aus diesem Grund sei die Debatte um das „Ob“: Ja oder Nein?“ zu Energiewende und Transformation zu einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung abgeschlossen, denn die Antwort lautet: „Ja! es geht nur so“! (DROEGE 2014, mündliche Diskussion, DOKONARA 2014 Lichtenstein). Denn echte Resilienz setze zwangsläufig Energieautarkie voraus, ebenso wie sie die Risikovorsorge einschließt und Strategien entwickelt, die die Handlungsfähigkeit der Gesellschaft in Krisensituationen aufrechterhält. Weiter bezieht DROEGE die lokale Energieversorgung mit ein, wenn es um die Entwicklung einer Energieautonomie geht und nicht um eine Energieautarkie. Ziel sei es doch, die lokale und regionale Unabhängigkeit von nicht erneuerbaren Energiequellen zu erreichen (DROEGE, 2014:39).

Eine autonome Selbstversorgung durch regionale Energienetze ist dezentralisiert, facettenreich, vernetzt und flexibel, da erneuerbare Energiesysteme schon rein technisch mit Reservekapazitäten durch Redundanz, Austauschbarkeit und Kopplungen arbeiten (DROEGE, 2014:39). Die in Agenden und Leitfäden stark betonte und erwünschte Dialogführung zwischen Kommunen und Bürgern und hiesigen Akteuren solle nicht vor der Selbstbestimmung der Kommunen Halt machen, denn schließlich solle sich die Monopolstellung großer nationaler Energiekonzerne nicht nur auf die lokale Ebene verlagern, sondern die echte Autonomie an die Bürger weitergeben (DROEGE nach Löwenstein 2001:10). Eine dezentralisierte Gesellschaft, in der eine soziale Bewegung notwendig ist, um ein eigenständiges Handeln zu ermöglichen, wartet nicht auf internationales Einvernehmen (DROEGE 2014:40).

Die Akteure der urbanen Transformation sind eindeutig die Bürger vor Ort, die gemeinsam an der Umsetzung arbeiten müssen. Dabei schlagen Experten vor, zunächst Schnittstellen zwischen informellen und formellen Verfahren zu schaffen und innovative Früherkennungssysteme für zukünftige Bedürfnisse zu entwickeln. Weiter sollten die Chancen digitaler Techniken genutzt und deren Anwendbarkeit gefördert werden. Projekte wie die Reallabore wurden von den Landesministerien gefördert, um zukünftige Bedürfnisse zu ermitteln, die wiederum die Grundlage für weitere Umsetzungsmaßnahmen darstellen (siehe HOCHSCHILD 2018, QUENEHERVE 2018).

Eine gegenwärtige Transformation setzt den Ausbau von Verantwortlichkeiten und die Einrichtung neuer Zuständigkeiten voraus, weshalb der Aufstockung des Personalbestandes große Bedeutung beigemessen wird (BMBF 2015:13). Daraus ergaben sich neue Ansprüche an den genutzten Raum. Um eine nachhaltige urbane Transformation zu schaffen, wird seither auf die Vernetzung von Raum-, Siedlungs-, und Infrastrukturen auf Gebäude-, Quartiers- und gesamtstädtischer Ebene gesetzt. Es werden Handlungsanreize durch Finanzierungs- und Logistikkonzepte vorgeschlagen, um Akteure für mehr Engagement zu gewinnen. Die Energieeffizienz sollte im Städtebau berücksichtigt und die Resilienz als etabliertes Stadtplanungsziel verankert werden. Eine resiliente Stadtplanung beinhaltet eine gesamtstädtische Betrachtungsweise, indem Stadtteile und Quartiere bis auf Gebäudeebene und Fassadenbau grün konzipiert werden. Dachbegrünung, Grünflächen, Urban Gardening zur Schaffung von Ökosystemdienstleistungen (bspw. Kaltluftherzeugung, lokaler Wasserkreislauf oder Retentionsflächen zur Dämpfung von Hochwasserereignissen) werden vorgeschlagen (BMBF 2015ff).

3.1.2. Neue Ansprüche an den Raum durch erneuerbare Energien

Seither wandelt die Energiewende auch die Raumnutzungsansprüche und ordnet dem Raum neue Grundfunktionen zu. Der Raum hat Fläche für die Energiegewinnung zu bieten. Die multifunktionale Flächennutzung als Wohn- und Lebensraum, für Gewerbe-, Industrie- und Produktionsstätten oder als Erholungsraum, um nur einige zu nennen, schafft Raumkonflikte. Der Raum mit seinen Potenzialen für Wertschöpfung durch agrarische, industrielle oder energetische Nutzung oder als Abbaugbiet für Rohstoffe (Minerale, Gesteine, Erden, Bodenorganismen, Arten Flora/ Fauna uvm.) verschärft Interessenskonflikte. Dies ist ein wichtiger Aspekt bei Bewertungsverfahren, um Raumkriterien qualitativ oder quantitativ zu deuten und sie damit als Qualität oder Quantität zu werten. Dabei werden meist quantitative Werte in eine Qualität des Raumes umgerechnet wie z.B. bei der Technikfolgenabschätzung (TA) und der Bewertung von Zielerreichungsgraden bei der die benötigte Energiegewinnung im Vergleich zur Investitionssumme gesetzt wird.

Die Verknüpfung von quantitativen und qualitativen Analysen führt zu komplexen Ergebnissen und Schlussfolgerungen, die im Kontext der Energiewende in Energieszenarien aufgestellt werden können. Darin werden unterschiedliche Wege vorgestellt, wie in der Zukunft mehrere Optionen möglich sind. Diese Zukunftsszenarien legen Möglichkeiten mit allen Begleiterscheinungen offen und geben Hilfestellung bei Entscheidungen, indem die möglichen Optionen visuell Gestalt annehmen (abgeleitet nach STEIERWALD& WEIMER-JEHLE 2018:448f).

Eine neue Bewertung von Flächen nach allen möglichen Potenzialen, die eine Fläche in sich trägt, wird hier erforderlich. Denn eine Auflistung aller möglichen qualitativen und quantitativen Merkmale einer Fläche können neue Bewertungsparameter hervorbringen. Insbesondere bei der Bewertung von Räumen nach ihrem erneuerbaren Energiepotenzial trifft dies zu und führt zu Diskursen darüber, ob der Energieertrag einer Fläche als quantitatives Kriterium der Gesellschaft auch qualitativ zur Energieautarkie der Gesellschaft beiträgt. Dabei spielen Flächennutzungen für CO₂-Kompensationsmaßnahmen und CO₂-Reduktionen (Grünland, Begrünung) eine zunehmende Rolle, um in CO₂-Bilanzierungen aufgenommen zu werden.

In der ethischen Betrachtung von Landnutzung und Ernährungsproduktion ist eine globale Betrachtung unerlässlich und wird als essentiell für eine Raumbetrachtung- und Bewertung aus nachhaltiger Perspektive gesehen (POTTHAST & MEISCH 2012). Dieser Diskurs um *Geoscience and Geoethics* hat sich in den letzten zehn Jahren entwickelt. POTTHAST (2021a) skizziert ein Programm für Forschungen an wissenschaftstheoretischen und interdisziplinären Ethikperspektiven, bei denen die zu lösenden Herausforderungen nicht ausschließlich als „Mensch gegen Natur“-Konflikte wahrgenommen werden. Der tiefgreifende gesellschaftliche Wandel zeigt sich in der Veränderung der gesellschaftlichen Grundeinstellung, aus der die Entwicklung von konkreten Visionen für ein gutes Leben hervorgehen: „embrace visions of a good life“. So ist der Fokus auf gemeinsame transformative Lösungsansätze zu legen. Deshalb wächst die Erwartung an die Geowissenschaften, in Zukunft verstärkt auch essentielle Forschungsfragen der *Ethik in den Wissenschaften* zu beantworten, denn Klimaschutz und Naturschutz erkennen ihre *Gemeinsamen Werte*, die auch gemeinsam zu erforschen sind (POTTHAST 2021b).

3.1.3. GIS - GIScience and Energies

Das richtige Werkzeug für diese notwendige Symbiose und Synergieschaffung bietet der Forschungsbereich GIS. *Geographische Informationssysteme (GIS)* sind das zentrale Werkzeug für die Simulation von Zukunftsprojektionen und fiktiven Visualisierungen. *GIScience and Energies* steht für Forschungsarbeiten der Geowissenschaften, die mithilfe statistischer Methoden in geographischen Informationssystemen erarbeitet und räumlich verortet werden. Dazu zählen klimarelevante Forschungen, die zunehmend globale und interdisziplinäre Datenverknüpfungen mit hohem Datenvolumen aufweisen und physisch-geographische wie antropogeographische Forschungsarbeiten verknüpfen (siehe ARNDT 2008, BENFER (2008), BOEHNER (2009), ENßLE (2009), BRÜCKNER (2012), KMOCH (2017), GOODCHILD (2018), CAMA et al (2020), HOCHSCHILD (2020).

Eine Auswertung ausgewählter geographischer Fachzeitschriften über 10 Jahre ergab, dass dieser Forschungsbereich nur in 2 % der veröffentlichten Beiträge thematisiert wurde. Allerdings wurde nicht ausgewertet, wie viele Fachzeitschriften in diesem Fachbereich neu aufgelegt wurden (BRÜHNE, 2009). Seit 2010 haben die Veröffentlichungen zu energierelevanten GIS-Anwendungen sehr stark zugenommen. Die meisten innovativen Modellierungsmethoden wurden innerhalb weniger Jahre entwickelt. Anschließend wurde der Fokus auf Schnittstellen und Datenkompatibilität verstärkt, um die entwickelten Methoden interdisziplinär anwendbar zu gestalten. Mit zunehmender Etablierung und kommerzieller Vermarktung von Geo-Apps wurden interaktive anwenderfreundliche Programme entwickelt, die die Anwender nicht mit Daten überforderten. Dazu bietet die Geographie-Didaktik neue interaktive Lehr- und Lernmethoden (siehe auch ZIMMERER 2013, ROUX, v. 2020, SCHULZE & GRYL 2022).

Zeitgleich forciert die zunehmende Digitalisierung auch die internationale Datenverknüpfungen, die zur rasanten Weiterentwicklung interaktiver Auswertungsmethoden beiträgt. Parallel dazu sind Geodaten heute leichter verfügbar als vor 10 Jahren. Umständliche Antragsverfahren hemmten internationale Forschungsprojekte.

Mit der Datenverfügbarkeit konnte sich die Geoinformatik in der modernen Geographieforschung, insbesondere in der *Geographie der erneuerbaren Energien* durch flächendeckende Standort- und Potenzialanalysen als eigenständiger Forschungsbereich weiter hervorheben, da globale Datenauswertungen ermöglicht und vervielfältigt werden BOEHRER (2009), OTTMANN (2010), (HOCHSCHILD 2020).

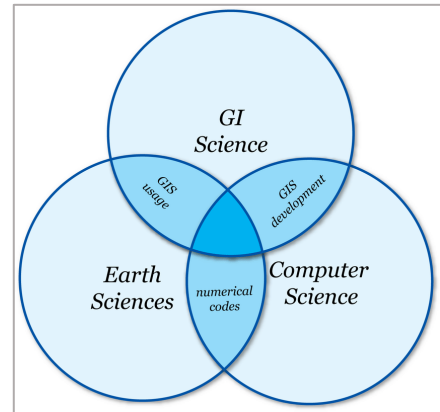


Abb. 1: GIScience beansprucht eine holistische Schnittstelle als Verbindungswissenschaft darzustellen. (KMOCH, 2017)

Als IT-gestützte Software bietet GIS Analyse- und Konstruktionswerkzeuge für Standortuntersuchungen zu Energieinfrastrukturen (EIS). Diese Instrumente bieten für klassische Planung verbesserte Methoden zur Standortbewertung nach qualitativen und quantitativen Daten. Gis-gestützte Modellierungen bis hin zu *Building Information Modells (BIM)* machen Prozesse der digitalen Nachhaltigkeit abbildbar. (VETTER 2018). Aktuelle Forschungsarbeiten zur Feststellung des *Ökologischen Fußabdrucks* (CO₂-Footprint) und des *Ökologischen Handabdrucks* (CO₂-Handprint) evaluieren Daten, um den CO₂-Ausstoß und die CO₂-Einsparung genauer zu ermitteln (myclimate 2020, myclimate 2022, SRU 2022). Die ganz persönliche CO₂-Kontoführung wurde zum Vergleichbarkeitsindex für umweltfreundliches und klimaschützendes Verhalten und einen nachhaltigen Lebensstil. Dieser Fachbereich weckte unter Nachwuchswissenschaftlern großes Interesse für neue innovative Forschungsmethoden in der GIS-Forschung zu Klimawandel und Klimaanpassung (siehe LÜBBERT 2007, UBA 2009, UBA 2019a, myclimate 2020, myclimate 2022, SRU 2022).

Das höchste Synergiepotenzial für *GIScience and Energy* steckt in den Forschungsbereichen *Carbon estimation and inventory, energy infrastructure placement and transition und household energy conservation and efficiency* (HORNER et al., (2013), KRÄMER et al (2012), GOODCHILD (2018). *Zunehmend werden* Kenntnisse über Energiesysteme mit *GIScience* innovativ verknüpft (Goodchild 2018). Damit hat der Forschungsbereich GIScience und im Allgemeinen die Geoinformatik an Bedeutung gewonnen, da die Methoden und Werkzeuge (Tools) hohe Forschungsrelevanz besitzen und inzwischen zu *Smart Services* zählen. Es entstanden neuartige und innovative Geschäftsmodelle, die von MADLBERGER (2022) zusammengefasst wurden. Zu *Smart Services* zählen auch geowissenschaftliche Informations- und Monitoring-Tools wie der Energieatlas (LUBW 2022b) und das neue Solarkataster (LUBW 2022c), der geologische ISONG-SERVER (LGRB 2013) und die interaktive Datenbank zu Wasser- und Quellschutzgebieten (LUBW 2022a), die vom Land Baden-Württemberg unter anderem für die CO₂-Bilanzierung und die Einhaltung der Klimaschutzziele verwendet werden (MUK BW 2017a+b).

Monitoring-Tools vereinfachen flächendeckende Untersuchungen und bieten erweiterte webbasierte *Tools* für unterschiedliche Zielgruppen im Internet an: für Bürger einer Gemeinde oder Mitarbeiter eines Unternehmens (vergl. CAMA et al (2020), LANG et al (2020), HOCHSCHILD (2021), KANAeva et al (2018), QUÉNÉHERVE (2018). Die hohe Methodenvielfalt WebGIS-basierter Analyse-Tools ermöglichen Forschungsarbeiten mit ganzheitlichem Ansatz zu Nachhaltigkeit, Resilienz und Klimarelevanz (siehe auch BENFER (2008), KLÄRE (2012), ROTH (2021), NASHWAN (2021), SIMONETTI (2022), MASSIMO (2022).

Sie verfügen über Werkzeuge mit Signalwirkung wie z.B. *ample cases of spacial analysis*, die weitreichende globale Verbesserungsmöglichkeiten für Risikomanagement, Krisen- und Versorgungsmanagements und den Energiesektor anbieten (RAGHOO (2018)). Die Verbindung räumlicher (*spacial*) und zeitlicher (*temporal*) Maßstäbe, in Simulations-, Visualisierungs-, und Prognosemethoden liefert Erkenntnisse über CO₂-verursachende und CO₂-hemmende Regionen, die mit Kontroll- und Berichtsfunktionen direkt abrufbar werden und damit den wichtigsten Output für die Erreichung der Klimaschutzziele liefern (GOODCHILD (2018)). Der Bedarf an räumlich (*spatial*) *temporalen* Datenbanken, z.B. stunden-, tages- und monatsweise Evaluierung von Energieverbräuchen und Verkehrsaufkommen, steigt (KEMPER 2009, PETER 2013). Hinzu kommen Datenanalysen zu Wetterphänomenen, Waldbränden, Überflutungen und Dürreperioden. Die Auswirkungen des Klimawandels sind in Untersuchungen zu Erosion, Bodendegradation und Landumnutzung sind mit GIS-Modellierungen erforscht worden von (siehe CAMA et al. (2020), KANAEVA et al. (2018), LANG et al. (2020), HOCHSCHILD 2021, OMRAN et al. 2021, POTTHAST 2021, ROTH 2018, ROTH 2021, SOMMER, Chr. 2021, UN 2018).

Der Bedarf an *GIScience and Energies* zeigt sich in der Nachfrage an globalen Datenanalysen zum hochkomplexen Ökosystem, Energiemodellierungen und CO₂- und Klimasimulationen. Der Klimawandel als ein globaler Prozess erfordert weitere interdisziplinäre Forschungen, die überwiegend auf Basis geophysikalischer Parameter durchgeführt werden. Deren geopolitische Bedeutung hat die Geoinformatik als eigenen Forschungsbereich etabliert. Statistische Auswertungen mit hochaufgelöstem räumlichem Bezug ermöglichen es, punktgenaue Simulationen und Szenarien virtuell darzustellen und machen große Geodatenbasen handhabbar (ebd.).

In interdisziplinärer Zusammenarbeit sind innovative Forschungsmethoden zu automatisierten Verfahren weiterentwickelt worden und haben Lösungen im Umgang mit *Big Data -sogenannten Massendaten* - erarbeitet. Dazu sind umfassende Prozesse zur Identifikation komplexer und sehr diverser Daten erforderlich, die in kürzester Zeit, strukturiert, klassifiziert, rektifiziert und analysiert werden müssen (BRUHN & HADWICH, 2022). Zugleich steht der Begriff für die digitale Technologisierung und den aktuellen Prozessen der Digitalisierung, indem Daten auf digitalem Weg verfügbar gemacht und verknüpft werden. Dies ist insbesondere beim Aufbau weltweiter und effiziente Klimadatenbanken erforderlich (BOSCH 2010, BRÜCKNER 2012, GOODCHILD (2018)).

3.1.4. CAFM - 3D - im Einsatz für Universitätskonzepte

Universitäten mit großen Gebäudebeständen stehen vor der Herausforderung das Energie- und Gebäudemanagement klimaneutral zu gestalten. Die Steuerung interner Verwaltungsprozesse ist dabei ebenso zu optimieren wie die Reduzierung aller Ressourcenverbräuche. Dafür sind Datenerhebungen zu allen Verbräuchen erforderlich, um IST-Zustände zu erfassen. Meist sind ablesbare Zähler weder installiert noch auf eine automatisierte Zählerstruktur aufgeschaltet. Die Digitalisierung des Energiesektors fordert den Ausbau automatisierter Zählerstrukturen um Energieverbräuche genau zu ermitteln und den Erfolg von Energiesparmaßnahmen zu dokumentieren. Hier kann der Einsatz eines umfassenden *Computer Aided Facility Management Systems (CAFM)* bei der Steuerung interner Prozesse ebenso wie bei der Organisation eines effizienten Flächenmanagements unterstützen.

Das zeichnet sich neben dem technischen und infrastrukturellen Gebäude- und Energiemanagement, auch durch ein interaktives Verwaltungssystem aus. CAFM-Systeme erhöhen die Planungssicherheit im Bauwesen, der Arbeits- und Betriebsgewährleistung, Instandhaltungs- und Wartungsmanagement, in der Planung von Reinigungseinsätzen, dem Schließ- und Sicherheitsmanagement sowie dem kaufmännischen Gebäudemanagement (Grundvermögen, Finanzwesen, Controlling). Sie schließen betriebswirtschaftliche Prozesse, Dokumentationen und Öffentlichkeitsarbeiten mit ein (STRATMANN 1998, DOMSCHEID 2010, HIS 2013).

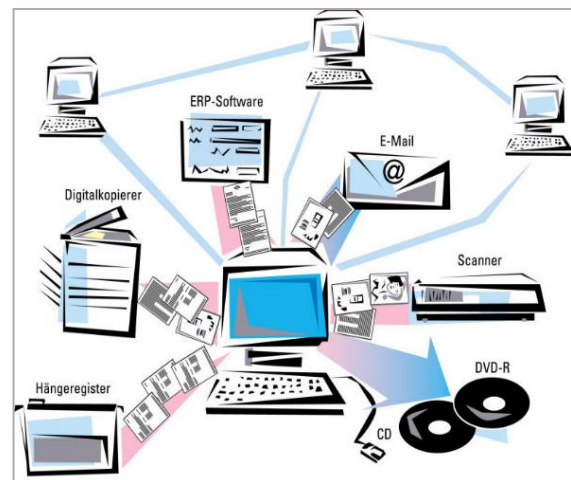


Abb. 2: Facilitymanagement - CAFM (DocuWare 2022)

Darüber hinaus erweitern Universitäten und Hochschulen das Energie- und Gebäudesektor durch zwei- und dreidimensionale Modellierungen, die heute Stand der Technik sind. Für die Modellierung des Geländes werden unterschiedliche Daten implementiert, sodass ggf. der Untergrund, Gebäude, Fassaden und Dächer, Vegetationsflächen maßstabsgetreu in einem Modell visualisiert werden können. Die geometrische Genauigkeit und ingenieurtechnische Feinheit als City-GML ist Voraussetzung für die detaillierte Darstellung eines größeren Gebäudebestandes. Genaue Gebäudegrundrisse werden übernommen, Fassaden und Dächer digitalisiert und Luftbilder auf das Oberflächenmodell projiziert. 3D-Modellierungen im sogenannten *Level of Detail (LOD 1 oder 2)* verfügen über unterschiedliche Detailtiefe. Erst mit einer differenzierten Darstellung der Dachformen, Einstrahlungswinkel und Flächengrößen können Solarpotenziale sinnvoll analysiert werden um Potenzialanalysen zu erstellen.

Das Beispiel des Campussystems der Hochschule Dresden (HTW): für die Energieversorgung wurden Potenzialabschätzungen für erneuerbare Energien erstellt und ein digitales Campus-Infrastruktursystem aufgebaut, das in Zusammenarbeit mit der Geoinformatik und Mathematik erarbeitet wurde. Ein 3D-Campusmodell wurde erstellt, das im Rahmen eines ganzheitlichen Universitätskonzepts ein städtebauliches Modell im Maßstab 1:1.000 darstellt. Alle Liegenschaften des HTW City Campus und die Technische Universität Dresden und der Innenstadt wurden dargestellt. Bedingungen des Denkmalschutzes wurden im Rahmen von quartiersbezogenen Energiekonzepten in das Modell integriert um die städtebauliche Vielfalt, bedingt durch DDR-Architektur an der 3D-Darstellung zu bewerten (Universität Dresden 2010:10ff).

Ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich von 3D-Stadtmodellen liegt in der Simulation des Wärmeverlustes an Gebäuden. Mithilfe von Wärmebildkameras (Infrarot) werden thermographische Aufnahmen der Fassaden und Dächer erstellt und als 3D-Wärmeatlanten dargestellt (STILLA & HOEGNER, 2007; CORRADINI, 2014). 3D-Wärmeatlanten stellen den Stand der Forschung in der Gebäudesanierung bzw. -Dämmung dar, da die Aufnahmen Wärmelücken im Mauerwerk sichtbar machen und die Gebäudesanierung und -dämmung zielgerichtet umgesetzt werden kann. Unterschiedliche Gebäudeklassen werden analysiert und simuliert (COORS, 2014:20ff).

Aktuell fordert das Monitoring der Klimaschutzziele des Landes Baden-Württembergs die Modernisierung und Digitalisierung des Gebäude- und Energiemanagements im staatlichen Hochbau, um die Energieverbräuche kontrollierbar zu gestalten (MUK BW 2017a, MUK BW 2017b, MUK BW 2017c). Eine Prozessanalyse im Rahmen von Zertifizierungen wie EMAS deckt auf, wo Optimierungen wichtig sind und wo Strukturen für die Umsetzung verbessert werden können (EMAS 2021).

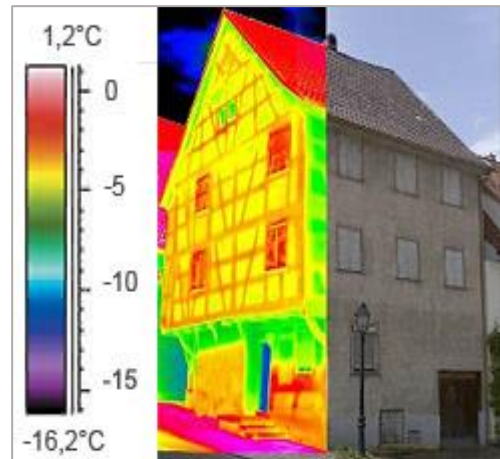


Abb. 3: Thermographie am Altbau (Kraftwerker 2021)

Um angesehenen Netzwerken beitreten zu können, sind Zertifizierungen erforderlich, um die bereits wesentliche Transformationen in Verwaltung und Forschung zu dokumentieren. Dem *International Sustainable Campus Network* (ISCN) gehören die Universität Dresden und die Hamburger Hochschule für angewandte Wissenschaften an (für Beispiel Hamburg siehe MATTHIAS 2014, COORS 2014). Die Universität Dresden, die ETH Zürich und Harvard University sind als Mitglieder des ISCN. Weitere Netzwerke sind Netzwerk n e.V. (2016), sneep.e.V. und Hoch N (2018) entstanden aus Studierenden-Initiativen, die Forschungsprojekte im Bereich Nachhaltige Entwicklung umsetzten und die interne Zusammenarbeit forcierten, transformierbare Prozesse wurden durch Eigenengagement optimiert.

Computergestützte Konstruktionssysteme (CAD), geographische Informationssysteme (GIS) und gebäudespezifische *Computer-Aided Facility Managementsysteme* (CAFM) unterscheiden sich in den 2D- und 3D Darstellungsmöglichkeiten. Die kostenintensiven Lizenzen von ESRI / ArcGIS, ARC-Scene und ARC MAP und die Erweiterung Xacto ER MAPPER, Earthsoft's EquiS 3D, Leapfrog 3D, RockWorks, GOCAD werden zunehmend durch Open-Source Software wie Quantum GIS, SAGA GIS, Google Earth Erweiterungen ersetzt (ARNDT 2008; MEI 2008; weiterführend SARAVANAVEL et al. 2020; NASHWAN et al. 2021).

Für den Energiesektor bieten intelligente Messwerterfassung und -anzeige des Smart metering viele Möglichkeiten der Fernabfrage von Energieverbräuchen oder einer *Smart Home-Steuerung*. Nach APPELRATH (2011) kann die Energiewende ohne *Smart Grid* nicht gelingen. Inzwischen fällt neben *Smart metering* dem umfassenden Angebot an *Smart Services* eine wesentliche Bedeutung zu. Wegen des möglichen Trackings von Bewegungen, Körperfunktionen, Emotionen (EIS) verstößt die umfassende Datenevaluierung hier gegen den privaten Datenschutz, da die Kontrolle über Art und Menge gesammelter Daten nicht gewährleistet werden kann (BENENSON (2022)). Denn die Nutzung von IoT-Systemen (Internet of Things – Vernetzung von Sensoren, Soft- und Hardware, Funktechnologie, Machine-to-Machine Technologie im Internet) spielt für die digitale Selbstbestimmung eine fundamentale Rolle in unserer Gesellschaft. Hier knüpfen unter anderem die Fachbereiche der Künstlichen Intelligenz an, die einerseits eine Verbrauchsreduzierung durch effiziente autonome Steuerungen verspricht und zugleich zu steigender Elektrifizierung und Elektrifizierung führt (ebd.).

3.2. Weg vom Öl und Gas – Klimaschutz in Theorie und Praxis

Der Klimawandel fordert eine radikale Veränderung unserer bisherigen Lebensgewohnheiten. Die Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen steht im Vordergrund. Nach *Peak Oil* und dem Ende des Ölzeitalters, können laut einschlägigen Forschungen nur die Gesellschaften weiterleben, die sich frühzeitig widerstandsfähig gemacht, die sogenannte Resilienz erreicht haben (MEADOWS 1972). Der Begriff Resilienz stammt aus der Ökologie und bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, auf äußere Veränderungen zu reagieren und dabei am Leben zu bleiben. Dieser Begriff wurde in die Nachhaltigkeitsforschung und die Sozialwissenschaften übernommen. Geographische Stadtmodelle sprechen von *Resilience Alliance*, wenn eine Gesellschaft Stresseinwirkungen wie ökologischem Wandel oder sozialen, ökonomischen und politischen Umbrüchen standhält (MILKOREIT 2016, WALKER 2016).

Die Stadtforschung zählt einer Resilienzstrategie die Berücksichtigung aller Aspekte (naturwissenschaftliche, technologische, ökologische und ökonomische, räumliche und soziale), um umfassende Chancen- und Risikokataster auf Grundlage von Vulnerabilitäts- und Risikoanalysen zu erstellen. Die Prävention für Katastrophenschutz und verbesserungswürdige Infrastrukturen als Teil der Resilienz gegenüber dem Klimawandel und durch Klimaanpassung ist ebenfalls Teil einer Resilienzstrategie (BMBF 2015:3ff).

1996 legten die Vereinten Nationen gemeinsame Richtlinien (IPCC 1996) für eine globale Berichterstattung fest, wonach Staaten angehalten sind, ihre Treibhausgas-Emissionen auszuweisen. 1997 verabschiedeten die Vereinten Nationen die *Bestimmungen der Klimarahmenkonventionen* in Kyoto. Auf globaler Ebene gestalten sich sowohl Konsensfindung als auch Umsetzung der Klimaschutzziele immer noch sehr komplex. Auch wissenschaftlich zweifelsfreie Forschungsergebnisse, die den Klimawandel als vom Menschen gemacht belegen und die bereits 2007 mit dem 4. Sachstandsbericht des IPCC vorlagen (COP 21), beschleunigten die globale Umsetzung der wirtschaftlichen und politischen Herausforderungen lange nicht – das gemeinsam festgelegte Ziel, eine weltweite Klimaerwärmung bis maximal +1,5 °C zu begrenzen, wurde nicht von allen Staaten konsequent verfolgt (UN 2018, siehe auch ICAP 2009: Anfänge zum internationalen Allokationsplans, ICAP 2017, ICAP 2019: zu Emissionshandelssystemen).

Auch das von den Vereinten Nationen 2015 verabschiedete **Pariser Klimaabkommen** wurde intensiv diskutiert und kritisiert (COP 22 Marrakesch 2016 und COP 23 Fidschi/Bonn 2017). Mit den darin aufgeführten Zusammenhängen zwischen gesellschaftlichem und wirtschaftlichem Wohlstand sowie dem Umweltschutz wird eine nachhaltige Entwicklung in allen Bereichen eingefordert, um die globale Erwärmung auf 1,5 bis max. 2 °C zu beschränken (IPCC 2018). Parallel zu den Klimaschutzzielen verabschiedeten die Vereinten Nationen die **Globale Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung**, in welcher 17 Nachhaltigkeitsziele (United Nation Sustainable Development Goals – kurz SDGs) für Ökonomie, Ökologie und Soziales definiert werden (UN 2016; IPCC 2014). Insbesondere in den Beschreibungen der Ziele 7 (nachhaltige Energie), 13 (Bekämpfung des Klimawandels) sowie 15 (Wald-/Ökosysteme schützen) werden die Treibhausgase thematisiert.

Für die Reduktion der Treibhausgas-Emissionen sind Energieeinsparung, Steigerung der Energieeffizienz, Umstellung auf emissionsärmere fossile Brennstoffe wie erneuerbare Energien, CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS) vorgeschrieben (IPCC 2014, IPCC 2019). Da sich die Festlegung des Maximalausstoßes von Treibhausgas-Emissionen von Nation zu Nation sehr stark unterscheidet, einigte man sich auf ein Pro-Kopf-Ziel, welches mit dem **Under2 MOU**-Ziel von 2 CO₂ t pro Jahr und Einwohner im **Memorandum of Understanding** (MOU) in Kalifornien im Jahr 2015 definiert wurde.

3.2.1. Die Verankerung der Klimaschutzziele und ihre Umsetzung

Mit der Verankerung des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) im Jahr 2019 verpflichtete sich Deutschland zur nationalen Umsetzung der Pariser Klimaschutzziele von 2015. Die CO₂-Emissionen sollen bis 2030 um 55 %, bis ins Jahr 2050 um 80 bis 95 % – je nach Sektor im Verhältnis zum Basisjahr 1990 – reduziert werden. Deutschland verpflichtete sich zu einer Annäherung an die Klimaneutralität (BMWK 2016b). Die Klimaschutzziele gelten für die Sektoren: Stromversorgung, Private Haushalte, Industrie, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen, Verkehr, Öffentliche Hand, Land-/Forstwirtschaft / Landnutzung). Der Gebäudesektor, der alle privaten, öffentlichen und gewerblichen Gebäude umfasst, verursacht 1/3 der gesamten Treibhausgase in Deutschland (BMUV 2019). Vergleichbar mit der verzögerten Umsetzung des Kabinettsbeschlusses auf Bundesebene, ergaben sich auch auf Landesebene Fortschritte und Rückschläge bei der Festschreibung der Klimaschutzziele.

In Baden-Württemberg wurden die national geltenden Vorgaben erstmals 2007 überführt und 2013 mit dem weiterentwickelten *Klimaschutzgesetz (KSG)* und 2015 mit dem ersten Klimaschutzpakt *Baden-Württemberg* konkretisiert. Im ersten Teil des *Klimaschutzpakts* war ein Stufenplan bis 2050 unter Beteiligung der kommunalen Landesverbände. Der Klimaschutzpakt wurde zunächst für die Jahre 2016 und 2017 vereinbart und für die Jahre 2018 bis 2020 fortgeschrieben. 2021 folgte die gesetzliche Verpflichtung der Energiewende mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien im Klimaschutzgesetz, das die Reduzierungsziele für Treibhausgase wie folgt festlegte (s. Abb. 6). Gegenüber 1990 sollen bis:

bis 2030

- Treibhausgasemissionen um 50-55 % reduziert werden
- der Ausbau des Anteils erneuerbarer Energie auf 32 % erhöht werden
- die Energieeffizienz um mindestens 32,5 % gesteigert werden

bis 2040

- Treibhausgasemissionen um mindestens 70 % reduziert werden
- der Ausbau des Anteils erneuerbarer Energie auf bis zu 45 % erhöht werden

bis 2050

- Treibhausgasemissionen um 80–95 % reduziert werden
- der Ausbau des Anteils erneuerbarer Energie auf dann 60 % erhöht werden

Die Erreichung der Reduzierungsziele setzt den steten Ausbau erneuerbarer Energien (EE) voraus. Die Treibhausgaseinsparung im Gebäude- und Energiesektor hängt stark von diesem Ausbau ab. Ergänzend hierzu wird eine Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs um 50 % bis 2050 angestrebt. Hierzu sind unterschiedliche prozentuale Zielangaben für Primärenergie, Wärmebedarf, Verkehr und Stromverbrauch festgelegt (s. Abb.4):

Als Bestätigung des Klimaschutzgesetzes von 2013 (KSG) wurden die wichtigsten Konkretisierungen der bundesweiten Klimaschutzziele mit dem *Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg* (MUK BW 2016) auf Länderebene übertragen. Die Reduktion von Treibhausgasen, bezogen auf das Jahr 1990, wurde darin für Baden-Württemberg wie folgt definiert (MUK BW 2016):

- bis 2020 um mindestens 25 %
- bis 2030 um mindestens 42 %
- bis 2050 um 90 %

	2020	2030	2040	2050
Treibhausgasemissionen (gegenüber 1990)	min. -40 %	mind. -55 %	mind. -70 %	80 bis 95 %
Anteil erneuerbarer Energien				
Bruttoendenergieverbrauch	18 %	30 %	45 %	60 %
Bruttostromverbrauch	mind. 35 %	mind. 50 %	mind. 65 %	mind. 80 %
	2025: 40-45 % (EEG 2017), 2035: 55-60 % (EEG 2017)			
Senkung Energieverbrauch (gegenüber 2008)				
Primärenergieverbrauch	-20 %			-50 %
Wärmebedarf Gebäude ¹	-20 %			-80 %
Endenergieverbrauch Verkehr (gegenüber 2005)	-10 %			-40 %
Bruttostromverbrauch	-20 %			-25 %
Endenergieproduktivität			2,1 %/a	

Abb. 4: Zielsetzungen der Energiewende in Deutschland (MUK BW 2016)

Um die Umsetzung der Ziele stetig überwachen zu können, hatte Baden-Württemberg ein Monitoring-Verfahren eingeführt, mithilfe dessen die Maßnahmenkataloge zu Klimaschutz und Energiewende planerisch und finanziell überprüft wurden. Am 19. September 2017 hat der Ministerrat den **Monitoring-Bericht** zum Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg (KSG-BW) in Zusammenhang mit dem **Integrierten Energie und Klimaschutzkonzept** (IEKK) behandelt. Die Ministerien wurden beauftragt, Weiterentwicklungsmöglichkeiten des IEKK in ihren jeweiligen Zuständigkeitsbereichen zu prüfen und Klimaschutz zu aktivieren. Auf Basis des föderalistischen Prinzips schaffen die Regionen die planerischen Voraussetzungen selbst, die zum Ausbau von Energieinfrastruktur und Klimaschutz benötigt werden. Die konkrete Umsetzung der Maßnahmen erfolgt auf kommunaler Ebene.

➔ **Der auf kommunaler Ebene umzusetzende prozentuale Anteil der Klimaschutzziele wird in dieser Arbeit auf das Untersuchungsgebiet übertragen und wird in einem Stufenplan modelhaft vorgeschlagen.**

Im IEKK wurden Zukunftsszenarien für die Reduktion des Endenergieverbrauchs bis 2050 prognostiziert. Die Zahlen zeigen die angestrebten Einsparungsziele für 2030, 2040 und 2050, die nicht ausschließlich durch den Ausbau erneuerbarer Energien erreicht werden können, sondern auch eine Reduktion des Gesamt-Endenergieverbrauchs voraussetzen.

3.2.2. Die Verschärfungen des Klimaschutzgesetzes seit 2021 auf Bundesebene

Seit 2021 meldete das Bundesverfassungsgericht teilweise erfolgreiche Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz (BMJV 2021), da die Regelungen des Klimaschutzgesetzes von 2019 in Teilen nicht mit den Grundrechten entsprachen. Es fehlten hinreichende Maßnahmen für eine weitere Emissionsreduktion ab 2031, welche mit dem Klimaschutzgesetz von 2021 – bekannt als **Generationenvertrag für das Klima** –

verschärft wurden. Als Reaktion auf das Urteil des Bundesverfassungsgerichts reagierte die Bundesregierung mit der Verankerung der Klimaschutzvorgabe „Treibhausgasneutralität bis 2045“ als Klimaschutzvorgabe, der begleitenden Erklärung – dem **Klimapakt Deutschland** (BGB 2021). Auf Grundlage der europäischen Energieeffizienzrichtlinie wird ein Berechnungsmodell für die Ermittlung einer angemessenen Sanierungsrate berücksichtigt, dass momentan eine energetische Sanierung von 2 % pro Jahr auf Bundesebene ausweist.

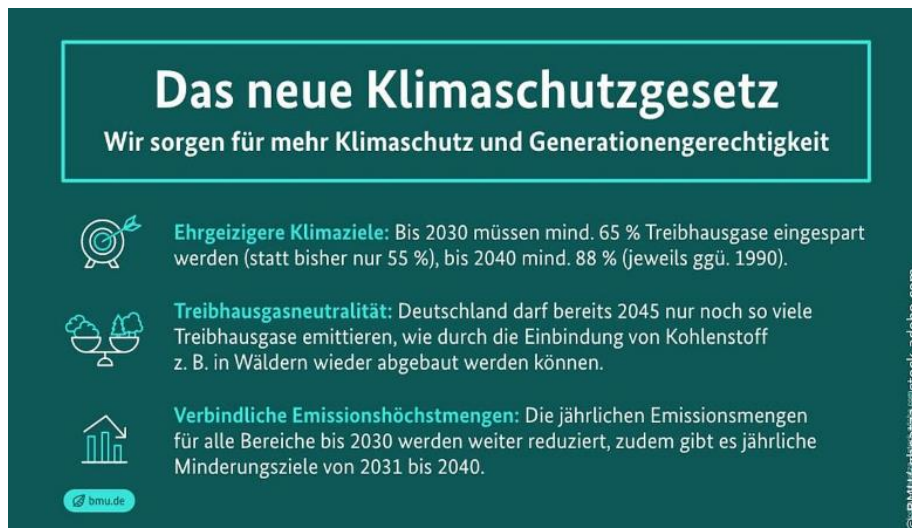


Abb. 5: Generationenvertrag für das Klima -Bundesklimaschutzgesetz (BVG 2021)

Mit dem **Klimaschutzpakt 2020/2021** traf die Landesregierung Baden-Württemberg eine Vereinbarung mit den kommunalen Landesverbänden, wonach – gemäß § 7 Absatz 4 KGS BW 2021 – Gemeinden, Städten und Landkreisen eine Schlüsselrolle beim Klimaschutz zukommt. Kommunen, die eine Vorbildfunktion einnehmen, werden zusätzlich vom Land unterstützt. Mit der Fortschreibung des **Klimaschutzpaktes** wurde das Fördervolumen für kommunale Klimaschutzmaßnahmen auf ca. 27 Mio. Euro erhöht. Allerdings ist für die Mittelbewilligung eine sogenannte *unterstützende Erklärung* beim Umweltministerium einzureichen. Denn für eine landesweite Förderung ist die festgelegte Summe zu gering, weisen doch einzelne Klimaschutzmaßnahmen bereits schon Kosten in Millionenhöhe auf. Aktuell sind über 400 Kommunen beigetreten⁶. Die wesentlichen Pfeiler dieses ambitionierten **Sofortprogramms** bilden folgende neue Regelungen (BRD 2021a):

Reduktion der Treibhausgase gegenüber 1990:

- bis 2030: um 65 % statt bislang 55 % CO₂,
- bis 2040: um 88 % weniger CO₂,
- bis 2045 Klimaneutral statt bis 2050

Daraufhin beschloss das Land Baden-Württemberg im Mai 2021, das Förderprogramm **Klimaschutz-Plus** fortzusetzen, um Kommunen, Unternehmen, kirchliche Organisationen und Vereine bei ihrem Einsatz für den Klimaschutz zu unterstützen und sie damit zu befähigen, am Koalitionsvertrag für Baden-Württemberg festhalten zu können. Die Mittel dafür sollen aus dem 3. Klimaschutzpakt mit den kommunalen Landesverbänden bereitgestellt werden (MUK BW 2021).

⁶ Zugehörige Förderprogramme sind das „Klimaschutz-Plus“ und „KLIMOPASS“.

3.2.3. Klimaschutz im Gebäudesektor

In enger Verzahnung mit den Klimaschutzzielen wird die Energiewende fortgeführt, die sich die Bundesregierung zum politischen Ziel machte, um Deutschland zu einer der energieeffizientesten und umweltschonendsten Volkswirtschaften zu entwickeln. Die Entwicklungen in Klimaschutz, Energiewende und Nachhaltigkeit laufen parallel zueinander und greifen ineinander ein. Basierend auf föderalistischen Administrationsstrukturen der Bundesrepublik sind unterschiedliche gesetzliche Vereinbarungen über einen längeren Zeitraum wirksam geworden. Zielformulierungen und festgelegte Zeitspannen unterscheiden sich von Bundesland zu Bundesland. Verschärfungen der Anforderungen im Bauwesen, der Gebäudemodernisierung und -sanierung haben zu steigenden Baukosten und verlängerten Planungs- und Umsetzungsprozessen geführt. Staatliche Ausschreibungsverfahren sind komplexer und verzögern den raschen Abbau des Sanierungsstaus zusätzlich zu den Finanzierungsengpässen.

Während für Unternehmen und Privathaushalte neue Gesetze für Modernisierung und Gebäudesanierung verabschiedet wurden, gelten für Bundesbauten (bundes- und landeseigene Gebäude) konkrete Verwaltungsregelungen (Anweisungen der Landesregierung). Diese werden auf Bundesebene als Leitfäden (wie z.B. der Leitfaden für nachhaltiges Bauen (LFNB) vorgegeben, die die Landesregierung zu konkretisieren hat. Einen wichtigen Beitrag zur gelingenden Energiewende wird durch die *energetische Gebäudesanierung* geleistet, die den Ausbau und die Nutzung erneuerbarer Energien zu berücksichtigen hat.

Nach den Zerstörungen der beiden Weltkriege des 20. Jahrhunderts wurden in Deutschland viele Gebäude ohne gesetzliche Vorgaben errichtet. Ältere Gebäude sind durch strenge Regelungen als Denkmal geschützt und als Kulturgut zu erhalten. Hinsichtlich Bausubstanz und Energieeffizienz weisen diese Gebäude heute einen enormen Sanierungsbedarf auf. Konkrete energiewirtschaftliche Herausforderungen waren bereits seit den 1950er Jahren bekannt, da die Wahl von Bauweise und -materialien bis in die späten 1970er Jahre frei wählbar war. Per Gesetze und Verordnungen änderte sich das schrittweise ab 1978. Der historische bedingte Sanierungsbedarf des sehr diversen Gebäudebestandes, stellt heute die größte Herausforderung für die Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung dar. Aus wirtschaftlichen Gründen werden energetische Optimierungen überwiegend durch Einzelmaßnahmen realisiert, statt Komplettsanierungen eines Gebäudes durchzuführen.

In der Modernisierung der Bundesbauten strebt die Bundesregierung eine Vorreiterrolle an, indem geltende energetische, technische und bauliche Vorgaben zu übertreffen sind. Parallel zur Festschreibung der Klimaschutzziele wurden auf Bundesebene gesetzliche Vorgaben erlassen, die bei der Sanierung der Bundesbauten zusätzliche Anforderungen festschreiben. Die **Energie-Einsparverordnungen (EnEV)** wurden in ihren Anforderungen übertroffen, um diese Vorbildfunktion in den staatlichen Gebäuden zu gewährleisten. Dies wird an der steten Konkretisierung der **Energie-Einsparverordnung (EnEV)** deutlich: Die Überführung von europäischen Verordnungen in nationales Recht erfolgte mit EnEV 2007, die auch erstmals klimaschützende Maßnahmen vorgab. Darin wurde aus der europäischen Vorlage eine *Zonale Gebäudebewertung* vorgegeben. Mit Inkrafttreten der EnEV 2009 wurde auch die Eigenproduktion und -nutzung erneuerbarer Energien geregelt: Die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien durfte vom Endenergiebedarf abgezogen werden, wenn sie unmittelbar in räumlichem Zusammenhang mit dem Gebäude erzeugt wurde und vorrangig im Gebäude genutzt wird (LICHTMESS 2010; BMUV 2009a).

Während sich die Energieeinsparverordnung (EnEV) zu einer konkreten Umsetzungsverordnung für das Energie- und Gebäudemanagement entwickelte, wurde die Nutzung und Gewinnung erneuerbarer Energien durch den Erlass des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) sowie des Erneuerbare-Energien-Gesetzes-Wärme (EEGW) 2009 auf Bundesebene geregelt. Als Umsetzungsinstrument für die Verwaltung von Bundesbauten wurde dafür das **Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)** eingeführt. Es fungiert als ein vereinfachtes Verwaltungs- und Bewertungssystem zur Erreichung der klimaschützenden Sanierungsmaßnahmen auf Bundesebene und wurde vom Kriterienkatalog der **Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB)** abgeleitet (Lützkendorf 2014).

Das BNB bezieht sich explizit auf Büro- und Verwaltungsgebäude, da diese den größten Anteil der Bundesbauten ausmachen. Einen weiteren großen Anteil bilden Unterrichts- und Laborgebäude öffentlicher Einrichtungen wie Universitäten und Berufsbildungsstätten sowie deren Außenanlagen. Denkmalgeschützte Gebäude werden nach dem BNB besonders berücksichtigt, da sie als kulturgeschichtliches Gut mit erheblichem Wert für das Erscheinungsbild einer Stadt gelten (BMUV 2016a:30-59).

Das neue **Gebäude-Energie-Gesetz (GEG 2020)** wurde am 13. August 2020 verkündet und trat am 1. November 2020 in Kraft. Mit ihm werden verschiedene EU-Vorgaben in nationales Recht überführt. Als integriertes Gesetz in die „Gesetze zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze“ ist die offizielle Bezeichnung nun „Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (GebäudeEnergieGesetz – GEG)“ (BMJV 2020). Das GEG gilt für beheizte und gekühlte Gebäude und deren Anlagentechniken (Heizen, Warmwasser, Lüftung/Kühlung, Automation und Beleuchtung) und bildet eine neue umfassende Gesetzesgrundlage für alle Bereiche des Gebäudesektors.

3.2.4. Eine klimaneutrale Landesverwaltung 2030 in Baden-Württemberg

Auftakt für den offensiven Klimaschutz im Hochbau war die Entwicklung der Nachhaltigkeitsstrategie sowie der Start des Projekts **„Stärkung der Nachhaltigkeit im Staatlichen Hochbau, Nachhaltigkeitsstrategie Baden-Württembergs“** der Jahre 2008 und 2009. Darin wurde erstmals die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien in landeseigenen Liegenschaften vorgegeben (MF BW 2008, MF BW 2009/1, MF BW 2009/2 MF BW2009/3). Als Garant für die Umsetzung sollte dabei eine **Checkliste Nachhaltigkeit** unter Berücksichtigung der spezifischen Belange in der Vermögens- und Hochbauverwaltung dienen: **Handlungsfeld 1 – Ressourcenschonung, Klima- und Umweltschutz** – umfasste dabei die Zielsetzungen für die Bereiche Energie und Klimaschutz, Erneuerbare Energien, Energetische Ziele für Neubauten und Bestandsbauten, Baustoff und Konstruktionsvorgaben sowie Ziele für die Umnutzung und den Rückbau von Gebäuden und deren Flächeninanspruchnahme. Die Nachhaltigkeitsaspekte sollten bereits während des Planungsprozesses eines Gebäudes berücksichtigt und dokumentiert werden.

Das am 11. Dezember 2012 von der Landesregierung beschlossene **Energie- und Klimaschutzkonzept für landeseigene Liegenschaften** präziserte die Zielformulierungen dieser Handlungsfelder zur Erschließung von Klimaschutzpotenzialen der Landesbauten (MF BW 2015a). Mit der Verankerung des Klimaschutzgesetzes in Baden-Württemberg wird in § 7 die **„weitgehende Klimaneutralität der Landesverwaltung in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2040“** festgeschrieben. Dem landeseigenen

Gebäudebestand kommt dabei eine herausragende Bedeutung zu, da über 80 % der Emissionen der Landesverwaltung durch den Wärme- und Stromverbrauch verursacht werden. Für die Jahre 2020 bis 2030 wurde im *Energie- und Klimaschutzkonzept für landeseigene Liegenschaften* ein CO₂-Zielpfad definiert. Damit fanden die Novellierungen der Energieeinsparverordnungen (EnEV) von 2009 und 2011, die Verschärfung des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG), das Erneuerbare-Energien-Stromgesetz (EESTromG) sowie die Novellen Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz und Erneuerbare-Energien-Gesetz, EU-Energiedienstleistungsrichtlinie sowie der *Aktionsplan Energieeffizienz* ihre rechtliche Verbindlichkeit (MF BW 2013a, MF BW 2015, MF BW 2016). Allerdings ist für die Eigenproduktion und -nutzung von erneuerbarem Strom (z. B. Solar/PV) zu beachten, dass Solar-Strom in dem Gebäude zu nutzen ist, dem die Anlage unmittelbar baulich zugewiesen ist. Dabei darf der maximale Abzug der Strommenge vom Endenergiebedarf den berechneten Strombedarf nicht überschreiten. Und nur der überschüssige Strom darf ins öffentliche Netz eingespeist werden (BMUV 2008, BMUV 2017).

Seit 2010 strebte die **Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung** eine Vorbildfunktion an und realisiert seither erhöhte Energiestandards. Im Rahmen des **Maßnahmenprogramms Nachhaltigkeit** begannen erste innovative Pilotprojekte in der Gebäudesanierung. Im Jahr 2011 folgte dann der erste **Leitfaden für Nachhaltiges Bauen (LFNB)** des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit. Darin sind die Anforderungen an ein Gebäude hinsichtlich einer ökologischen, ökonomischen und sozialen Qualität definiert. Die Lebenszyklen eines Gebäudes – von der Phase der Planung, über die Errichtung, Nutzung und Modernisierung bis hin zum Rückbau – sind nach diesem Leitfaden zu gestalten. Die technischen und energetischen Anforderungen an ein Gebäude, wie sie im Leitfaden festgelegt sind, müssen dabei den baulichen, gesetzlichen sowie normativen Anforderungen (EnEV und ISO-Normen) entsprechen. Sie dienen als Arbeitshilfe für die Gebäudebewirtschaftung. Der LFNB hat dabei empfehlenden Charakter, der in Form von Dokumentationsinstrumenten und Nachweisanforderungen als einzusetzendes Pflichtenheft gilt. Neben der Sanierung eigener Liegenschaften hat die Landesregierung Baden-Württemberg die Förderung lokaler und regionaler Energiekonzepte eingeleitet, für die Energieeinsparpotenziale für Wärme und Kälte zu ermitteln sind. Besonders im Bereich Photovoltaik strebt die Landesregierung Baden-Württembergs eine Vorreiterrolle in Deutschland an (MF BW 2013b, BMU 2016a).

Da der Einsatz erneuerbarer Energien in Landesbauten die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern reduziert und damit einen signifikanten Beitrag zur Begrenzung des Energiekostenanstiegs leistet, sollte der Anteil erneuerbarer Energien im Wärmesektor durch den Anschluss an Nah- und Fernwärmenetze und den Ausbau zentraler KWK-Anlagen erfolgen. Insbesondere bei großen Baumaßnahmen bestehen Prüfpflichten für thermische Solarenergie und Photovoltaikanlagen, Bioenergie/-masse und oberflächennahe Geothermieanlagen. Zusätzlich sollte bei künftigen Ausschreibungen – unter Beachtung wirtschaftlicher Kriterien – die kontinuierliche Erhöhung des Anteils an Biogas und Ökostrom berücksichtigt werden. Seit 2002 wurde der Anteil an Ökostrom von 30 % (2010) bis auf 100 % (2015) angehoben. Inzwischen werden alle Universitäten in Baden-Württemberg mit Ökostrom versorgt (MF BW 2016; MF BW 2020b).

Weitere Richtlinien wurden in den Empfehlungen **„Nachhaltiges Nutzen und Betreiben von Gebäuden“** sowie **„Bauen im Bestand“** des Bundesministeriums (BMUV 2016) veröffentlicht, nach deren Vorgaben die Bundesbauten einer Gesamtbewertung unterzogen werden. Mithilfe eines Punktesystems nach den *„Regeln für Energieverbrauchskennwerte“* und *„Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“* sind demnach

entsprechende Erfüllungsgrade (Bronze, Silber, Gold) auszuweisen. Um deren Nutzung stärker in Erwägung zu ziehen, wurde die Bedeutung erneuerbarer Energien im BNB weiter betont und um den Primärenergiebedarf bzw. der Endenergiebedarf von Gebäuden zu minimieren (MF BW 2015b, MF BW 2017). Um diese Vorgaben erfüllen zu können, sind Potenzialanalysen für erneuerbare Energien, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt werden, durchzuführen.

Mit den Weiterentwicklungen der Energieeinsparverordnung (EnEV 2011, 2013 und 2016) kamen neue Definitionen für energiesparende Gebäude hinzu⁷. Es folgten Konkretisierungen durch die Novellierung 2012 und 2013, Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEWärmeG) und Umsetzung der **Europäischen Gebäuderichtlinie (EPBD)**. In der EnEV 2017 sind die energetischen Anforderungen an Neubauten noch einmal angehoben worden. Dies wurde mit der gesetzlichen Einführung der *Niedrigenergiegebäude* für öffentliche Neubauten ab 2019 weiterverfolgt. Im Bereich Sanierungen wurden seit der EnEV 2017 keine weiteren Vorgaben festgelegt, da sie bereits als anspruchsvoll gelten. Beim Kauf und Verkauf von Immobilien ist seither auch die Energieeffizienzklasse auszuweisen.

Durch die stufenweise Verschärfung der Mindestanforderungen an Neubauten und Bestandsgebäude bei Bundesbauten erschien eine Reduktion des Heizenergiebedarfs um ein Fünftel bis 2020 im Vergleich zu 2010 realisierbar. Allerdings ging man von einer Erhöhung der verfügbaren Mittel aus. Die jährliche Sanierungsrate betrug immer noch 1 %; erforderte aber eine Anhebung auf 3,3 % um die Ziele umsetzen zu können. Hinzu kam, dass ein Rückgang der jährlichen Neubaurate von 1 % auf 0,6 % angenommen wurde, was an einer rückläufigen Bevölkerungsentwicklung sowie der Sättigung des Marktes festgemacht wurde (BMBF FONA 2014).

Wegen mangelnder finanzieller Ausstattung erklärte die Bundesregierung bereits 2018, dass die bis 2020 gesteckten Ziele hinsichtlich der energetischen Gebäudesanierung verfehlt werden, da keines der 2.200 relevanten Liegenschaften eine energetische Gebäudesanierung durchlaufen habe. Begründet wurde dies durch die sehr anspruchsvolle Planung gemäß den festgelegten Energiekonzepten, weshalb noch keine Sanierungsmaßnahme abgeschlossen werden konnte. Das Ziel der Reduktion des Wärmebedarfs um 20 % bis 2020 wurde deshalb als zeitlich nicht realisierbar erklärt (MUK BW 2018a, MF BW 2020b).

Am 18. Februar 2020 erfolgte die bislang letzte Fortschreibung des **Energie- und Klimaschutzkonzeptes für landeseigene Liegenschaften 2020 bis 2050**. Mit ihr wurden die Klimaschutzziele noch einmal verschärft sowie der dafür notwendige Maßnahmenkatalog ergänzt (MF BW 2020b). Die geplante CO₂-Reduktion wurde darin von 55% auf 65 % angehoben. Die CO₂-Emissionen der Landesliegenschaften sollen um 80 % bis 2040 und bis 2050 um mindestens 90 % jeweils gegenüber dem Basisjahr 1990 reduziert werden.

Eine Kompensation der CO₂-Emissionen durch den Erwerb von Zertifikaten soll weitestgehend vermeiden werden (MF BW 2020b):

- 1. Ausbau von landeseigenen Photovoltaik-Flächen für maximale Ausnutzung und vollständige Eigennutzung des PV-Stroms der Dachflächen:**

⁷ Der Standard des Jahres-Primärenergiebedarfs eines Neubaus reduzierte sich zwischen 1977- 2015 stufenweise um 30% (70 % von 1977) i. d. gesetzlichen Vorgaben der WSchV 1977, WSchV 1984, WSchV 1995, EnEV 2002/ EnEV 2007, EnEV 2009 und EnEV 2013. Niedrigenergiegebäude, Nullenergiehaus, Passivhaus, Energieeffizienzhaus Plus, KfW- 40 – KfW 60 (EnEV 2004), KfW-Effizienzhaus 55-70 (EnEV 2007), KfW-Effizienzhaus 40-55-70-85-100-115 (EnEV 2009), Niedrigenergiegebäude EU-Richtlinie, Gesamtenergieeffizienz 2010, Niedrigstenergiehaus 2020 (GEG 2020).

- bis 2025 auf mindestens 130.000 m² (Leistung: ca. 18.500 Kilowatt peak)
- bis 2030 mindestens auf 175.000 m² (Leistung: ca. 25.000 Kilowatt peak)

2. Nutzung von Wärmepumpen

- in Verbindung mit Geothermie zur passiven Kälteerzeugung ⁸.

Um das Erreichen der Ziele hinsichtlich Energiewende, Klimaschutzgesetz und weiteren Konzepten zu sichern, veröffentlichte das Bundes-Umweltamt (UBA) in ein- bis zweijährigen Abständen seine Monitoring-Berichte. Parallel zu den Entwicklungen auf Bundesebene entstanden länderspezifische Konkretisierungen zur Einhaltung der Klimaschutzziele sowie deren Umsetzung – in Baden-Württemberg in Form des Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzeptes (IEKK BW). Darin wurden die konkreten Ziele für den landeseigenen Gebäudebestand festgelegt. Für die energetische Sanierung der Landesbauten wird weiterhin auf erforderliche Instandsetzungs- und Sanierungsmaßnahmen gesetzt, um den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen zu senken. Ein dafür vorgesehener Sanierungsfahrplan soll eine stufenweise Realisierung der Klimaneutralität anstreben: Die jährliche Förderung von 80 Mio. Euro bis 2030 soll u. a. in den Ausbau der erneuerbaren Energien fließen.

Am 11. Oktober 2021 trat die Verordnung des Umweltministeriums zu den Pflichten zur Installation von Photovoltaikanlagen auf Dach- und Parkplatzflächen (Photovoltaik-pflicht-Verordnung- PVpf-VO9 in Kraft. Die Landesverwaltung ist bis zum Jahr 2030 netto-treibhausgasneutral zu organisieren (bisheriges Ziel: weitgehende Klimaneutralität bis 2040). Ein weiterer Punkt ist die Anpassung und Fortschreibung der PV-Pflicht bei Neubaumaßnahmen, grundlegenden Dachsanierungen und Parkplätzen. Das Klimaschutzgesetz Baden-Württembergs erhielt dadurch ergänzende Bestimmungen für die Dachflächen der Landesbauten, von denen die relevanten Absätze für diese Arbeit aufgeführt werden. Danach werden Einzel-, Teil- und Gesamtdachflächen in § 2 wie folgt definiert (MF BW 2021b):

- Eine Dachfläche oder Gesamtdachfläche ist die Summe aller Einzeldachflächen eines Gebäudes.
- Einzeldachflächen sind zusammenhängende Teildachflächen einer Gesamtdachfläche, die durch sie umschließende Dachkanten voneinander abgrenzbar sind.
- Teildachflächen sind Teilflächen einer Einzeldachfläche, die sich durch die Art ihrer Nutzung voneinander unterscheiden.

Im Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg 2021 wird auch die schnellstmögliche Umstellung auf eine klimaneutrale Wärmeversorgung festgehalten und die Einführung eines CO₂-Schattenpreises bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bestimmt (MF BW 2021b).

3.2.5. Die Förderung der staatlichen Vermögens- und Hochbauverwaltungen (VuB)

Die **staatlichen Vermögens- und Hochbauverwaltungen** des Landes Baden-Württemberg betreuen die Landesbauten. Deren Hauptaufgaben sind der Erwerb, der Bau, Betrieb sowie die Verwertung von

⁸ In dieser Arbeit überwiegend als Wärmeerzeugung simuliert.

Immobilien zählt. Dabei fungiert die staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung als Bauherr, Eigentümer, Dienstleister und Kontrollinstanz für externe Dienstleistungsunternehmen, was auch die Betreuung freier Planer und Architekten – und damit das gesamte kaufmännische und technische Gebäudemanagement – miteinschließt. Dazu gehören:

- bedarfs- und funktionsgerechte Unterbringung von Behörden, sonstigen Landeseinrichtungen
- Standortoptimierung durch Zusammenlegung von Behörden
- aktive Grundstückspolitik durch Veräußerung, Vermietung, Erwerb und Anmietung
- strategische Planung und langfristige Konzepte
- Pflege der Baukultur und Bewahrung des kulturellen Erbes sowie
- Vermarktung und Präsentation der staatlichen Schlösser und Gärten

Bei der Erfüllung dieser Aufgaben nimmt die Berichterstattung zu Energieverbrauch, den Kosten sowie den CO₂-Emissionen einen besonderen Stellenwert in der Öffentlichkeitsarbeit ein. Die hohen Energiekosten der Landesbauten; die damit verursachten CO₂- Emissionen erforderten eine stufenweise Konkretisierung der Energieeinsparungen in Form von *Handlungsfeldern*. Zur Senkung der Energiekosten wurden hier drei Schwerpunkte verfolgt: die Feststellung des Sanierungsstaus, eine Energie-Analyse sowie die Berücksichtigung des Denkmalschutzes bei Modernisierungen. Die Planung der entsprechenden Maßnahmen sollte dabei unter strenger Kostenkontrolle erfolgen.

Für diese energetischen Maßnahmen stellte die Landesregierung Baden-Württemberg seit 2010 zusätzliche jährliche Haushaltsmittel in Höhe von 25 Mio. Euro bereit. Zuvor wurden bereits, bis Ende 2009, 10 Mio. Euro zur Durchführung von Klimaschutzmaßnahmen im Rahmen des **Impulsprogramms Klimaschutz** ausgegeben. Die Projektphase lief von Frühjahr 2007 bis März 2009, in der ca. 200 Baumaßnahmen an staatlichen Gebäuden und Liegenschaften im Wert von 11 Mio. Euro realisiert wurden (MF BW 2008, MF BW 2009a, MF BW 2009b, MF BW 2010) ⁹.

Zeitgleich lief für die Jahre 2009 bis 2011 das **Konjunkturprogramm im staatlichen Hochbau** mit weiteren rund 200 Baumaßnahmen im Wert von insgesamt 346 Mio. Euro; in energetische Maßnahmen flossen 90 Mio. Euro (MF BW 2009/2). In Tübingen wurden in den Jahren 2008/2009 bereits 39.2 Mio. Euro, 2011 rund 59 Mio. Euro sowie 2012 ca. 63 Mio. Euro in energetische Maßnahmen investiert (MF BW 2012b/2: 94f). Die landesweite Energiekosteneinsparung lag bei 1,2 Mio. Euro, was einer CO₂-Einsparung von 2.500 t CO₂ pro Jahr entsprach (MF BW 2010). Damit wurde deutlich, dass die Fördersummen bei Weitem nicht ausreichen würden, um den Sanierungsbedarf nach den vorgegebenen Standards (EnEV) umzusetzen.

Mit Hilfe von alternativen Finanzierungsformen wurden deshalb zusätzliche Mittel verfügbar gemacht. Zu diesen gehörten beispielsweise Arbeitshilfen (u. a. Dena-Leitfaden, Handreichung des Umweltministeriums **Finanzierungsinstrumente für Energiespar-Investitionen**). Aber auch das Energie-Einspar-Contracting, das VIRE-Verfahren mit dem Ziel einer Verfahrensvereinfachung sowie die Erweiterung des Refinanzierungszeitraumes wurden 2013 konkretisiert. Erst mit weiteren Investitionen in Energiesparmaßnahmen ab 2012 konnten signifikante Energiekosteneinsparungen erwirkt werden.

⁹ Siehe Methode in dieser Arbeit: eine prozentuale Abschätzung der Betriebskosten, da nicht alle Kennzahlen vorhanden sind.

Im Rahmen eines Sonderprogramms für das verwaltungsinterne Energiespar-Contracting stellte man in den Jahren 2012 bis 2014 insgesamt rund 50 Mio. Euro für energiesparende Maßnahmen bereit. Die Refinanzierung erfolgte wiederum aus den eingesparten Energiekosten, womit sich das externe und interne Contracting-Verfahren zu einem sich selbst tragenden Modell aus Investition in Energiesparmaßnahmen, Senkung der Energiekosten sowie Reinvestition in bauliche Sanierung und verbessertem Contracting entwickelte (MF BW 2013). Die Kostenanteile in den Jahren 2005-2030 werden mit der folgenden Graphik verdeutlicht:



Abb. 6: Bisheriger und künftig erforderlicher energetischer Kostenanteil der Bauprogramme für den staatlichen Hochbau (MF BW 2020a)

Der Kostenanteil für energetische Sanierungsmaßnahmen nahm von 2005 bis 2015 kontinuierlich zu. Nur in den Jahren 2015 bis 2017 nahmen die Ausgaben wieder ab. Dagegen wurde bis ins Jahr 2030 von relativ gleichbleibenden Kosten ausgegangen. Mit dem 2018 beschlossenen Programm wurde der finanzielle Verfügungsrahmen pro Jahr auf 70 Mio. Euro und am 2021 auf jährlich 80 Mio. Euro erhöht sowie weitere Mittel für Sonderausgaben zugewiesen (MUK 2021a, MUK 2021b).

- ➔ Betrachtet man die Kosten pro Sanierungsmaßnahme laut Energiebericht 2020 (MF BW 2020b), die zwischen 140.000 - 8 Mio. Euro liegen, dann wird deutlich, dass mit einer jährlichen Sanierungsrate von 2 % (80 Mio. Euro plus weitere Sonderfinanzierungen) in Baden-Württemberg ca. 10-20 Maßnahmen pro Jahr finanziert werden können.
- ➔ Damit wird deutlich, dass sich eine Aufarbeitung des bestehenden Sanierungsstaus hinzieht und eine Klimaneutralität im landeseigenen Gebäudebestand noch nicht sichergestellt ist.

Die Verschleppung der Klimaschutzziele ist damit auf die unzureichende finanzielle Ausstattung zurückzuführen. Die Energiekosten erforderten zusätzliche Investitionen in die energetische Sanierung der landeseigenen Gebäude. Dabei könnten die Kosten für Energie durch den Einsatz von erneuerbaren Energien reduziert werden. Auch eine langfristige Unabhängigkeit von den weltweiten Energiepreisen wäre möglich.

3.2.6. Entwicklung des Energieverbrauchs und -kosten in Baden-Württemberg

In der folgenden Abbildung ist die Zusammensetzung des Energieverbrauchs aus erneuerbarer Energie sowie auch dessen Anteil am Gesamt-Endenergieverbrauch (grau) dargestellt. Der Anteil des erneuerbaren Stroms und der erneuerbaren Wärme wird nach diesem Szenario bis 2050 ca. 90 % betragen, sofern der Endenergieverbrauch – wie hier aufgezeigt – gleichzeitig um 49 % reduziert wird (von ca. 280 TWh/a (1990) auf ca. 150 TWh/a (2050)). Sollte Letzteres nicht erreicht werden, nähmen die erneuerbaren Energien weiterhin einen Anteil von *nur* ca. 50–70 % ein und reduzierten die CO₂-Emissionen nicht im angestrebten Maße zur Erreichung der Klimaschutzziele.

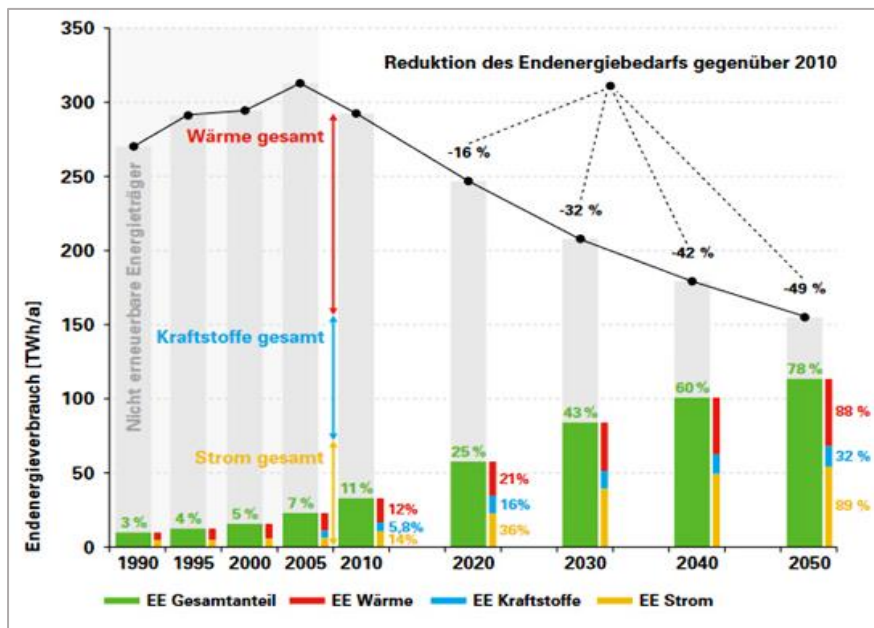


Abb. 7: Energieszenario 2050 – Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen und jeweilige Beiträge der erneuerbaren Energien

Um die parallel angestrebten Entwicklungen für den Bruttostromverbrauch zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 7 und 8, die voraussichtlichen Entwicklungen des Anteils der erneuerbaren Energien sowohl am Bruttostromverbrauch als auch am Bruttoenergieverbrauch (BMWi 2016).

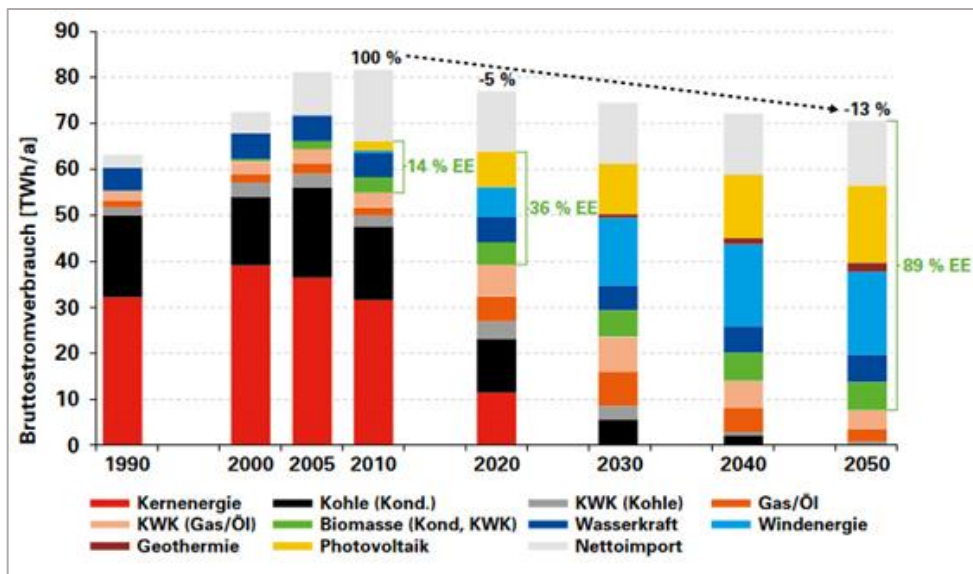


Abb. 8: Energieszenario 2050 – Die Entwicklung des Bruttostromverbrauchs (MUK BW 2016)

Daraus ist abzulesen, dass sowohl der „Anteil erneuerbarer Energien am Brutto-Endenergieverbrauch“ als auch der „Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch“ in Deutschland seit 2020 einen parallel nahezu linearen Verlauf ergeben, der bis ins Jahr 2030 auf 30 % bzw. 50 % ansteigt. Bis 2035 wird ein „Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch“ von 55–60 %; bis 2040 von 65 % und bis 2050 dann um 80 % erwartet. Der „Anteil am Bruttoendenergieverbrauch“ betrüge dann 2040 bereits 45 % und 2050 die festgelegten 60 %.

➔ Setzt man die Reduktion des Gesamt-Endenergieverbrauchs einmal voraus, lassen sich diese Vorgaben auf das Untersuchungsgebiet übertragen.

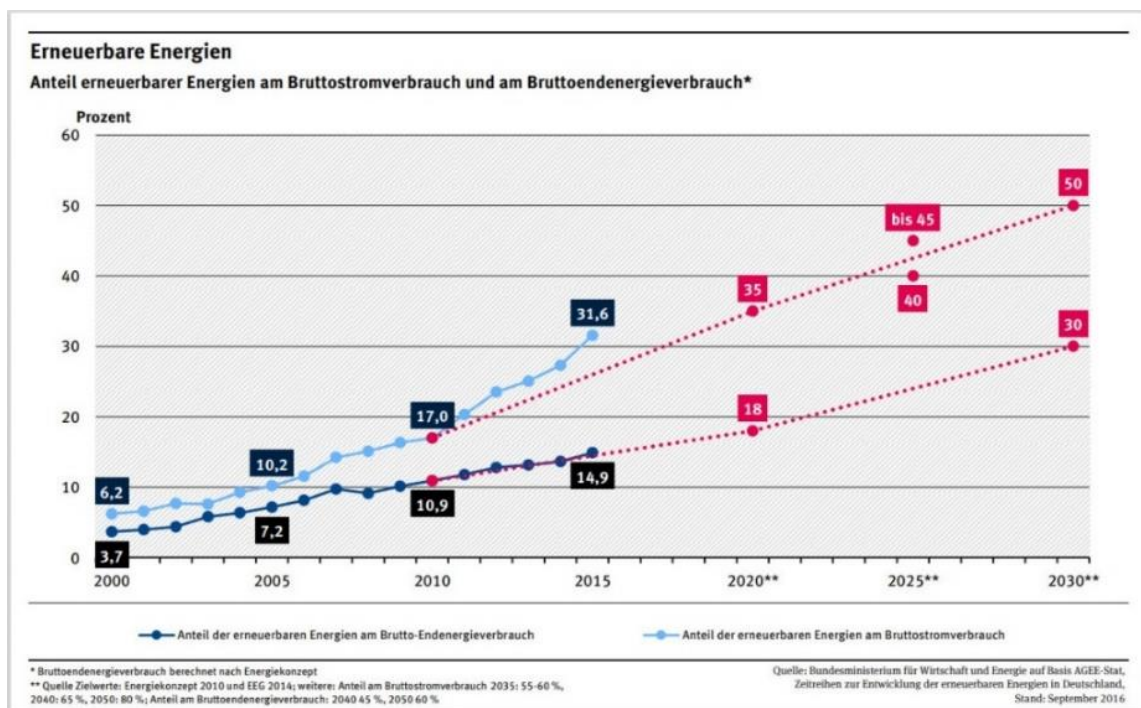


Abb. 9: Erneuerbare Energien – Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch und am Bruttoendenergieverbrauch (BMWi 2016)

Abbildung 9 prognostiziert die Entwicklung des Bruttostromverbrauchs im Kontext mit den wachsenden Anteilen erneuerbarer Energien. Eine schrittweise Reduzierung des Gesamtendenergieverbrauchs und der Ausbau der erneuerbaren Energien (Substitution von Atomenergie und fossilen Brennstoffen) zeigen den Weg zu einer fast kohlefreien Energieversorgung (Rest 2%) bis 2040 auf. Der Bruttostromverbrauch würde demnach 2050 zu 89 % aus erneuerbarer Energie gespeist werden, während noch 9 % des Energiebedarfs mit Erdgas und -öl gedeckt werden (nach ZSW/Nitsch, In: MUK 2016).

➔ **Eine Übertragung auf das Untersuchungsgebiet setzt hier die Berücksichtigung der Ökostromnutzung für landeseigene Gebäude voraus, die in Kapitel 3.3.3. beschrieben wird.**

Der landeseigene Gebäudebestand Baden-Württembergs umfasst 7.800 landeseigene Gebäude, die eine Nettogrundfläche (NGF) von ca. 11,5 Mio. m² aufweisen und ca. 35.000 Hektar Grundfläche besitzen. Dazu kommen 1.800 angemietete Objekte mit einer Nutzfläche (NF) von insgesamt 7,8 Mio. m². Die Entwicklungen des Energieverbrauchs sowie der dadurch verursachten Energiekosten sind seit dem Basisjahr 1990 für die Klimaschutzziele dokumentiert:

Tab. 1: Absoluter Wärmeverbrauch in Gigawattstunden (MF BW 2020a)

Absoluter Wärmeverbrauch [GWh]							
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Universitäten und Universitätskliniken	771	786	789	782	817	711	721
sonstige Landesgebäude	1.015	1.045	693	658	724	601	668
gesamt	1.786	1.831	1.482	1.440	1.541	1.312	1.389

Tab. 2: Absoluter Stromverbrauch in Gigawattstunden (MF BW 2020a)

Absoluter Stromverbrauch [GWh]							
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Universitäten und Universitätskliniken	362	400	434	474	533	566	571
sonstige Landesgebäude	215	235	238	253	299	282	298
gesamt	577	635	672	727	832	848	869

Tab. 3: Stromkosten in Mio. Euro (MF BW 2020a)

Kosten elektrischer Energie [Mio. Euro]							
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Universitäten und Universitätskliniken	34,4	37,0	30,2	44,0	80,0	87,4	93,6
sonstige Landesgebäude	33,8	35,0	22,5	31,2	56,2	51,1	60,3
gesamt	68,2	72,0	52,7	75,2	136,2	138,5	153,9

Tab. 4: Wärmekosten in Mio. Euro (MF BW 2020a)

Wärmekosten [Mio. Euro]							
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Universitäten und Universitätskliniken	19,5	24,6	28,0	38,0	53,9	47,5	49,0
sonstige Landesgebäude	26,7	28,3	24,8	35,9	44,9	41,2	43,1
gesamt	46,2	52,9	52,8	73,9	98,8	88,8	92,1

Aus den Aufzeichnungen lässt sich ablesen, dass die Energieverbrauchswerte für Wärme seit 2015 wieder anstiegen, während der Stromverbrauch bis 2019 kontinuierlich zunahm. Im Jahr 2000 verursachte der landeseigene Gebäudebestand Energiekosten von insgesamt 105,5 Mio. €. Mit den steigenden Energiepreisen stiegen auch die Energiekosten bis 2010 auf 235 Mio. € an. Trotz einer leichten Reduzierung des Energieverbrauchs sowie dem Bezug von 100 % Ökostrom stiegen die Gesamtkosten bis ins Jahr 2019 leicht auf insgesamt 245,4 Mio. € an (MF BW 2020a).

3.3. Entwicklung der CO₂-Emissionen des Energieverbrauchs

Die CO₂-Emissionen der landeseigenen Gebäude sanken im Zeitraum zwischen 1990 und 2015 um knapp 50 %. Bis ins Jahr 2019 konnte diese Reduktion bis auf 57 % gesteigert werden. Die CO₂-Emissionen beliefen sich insgesamt damit noch auf 285.465 t. Die Landesregierung wies dies als zielkonformen Erfolg im Klimaschutz aus und begründete dies mit der Umstellung auf 100 % Ökostrombezug für alle Landesbauten sowie der Durchführung zahlreicher energetischer Sanierungen bei Bestandsgebäuden im Rahmen von Baumaßnahmen und energetischen Sonderprogrammen. Die weiteren Zielvorgaben bis ins Jahr 2050 hatte das Land BW wie folgt festgelegt:

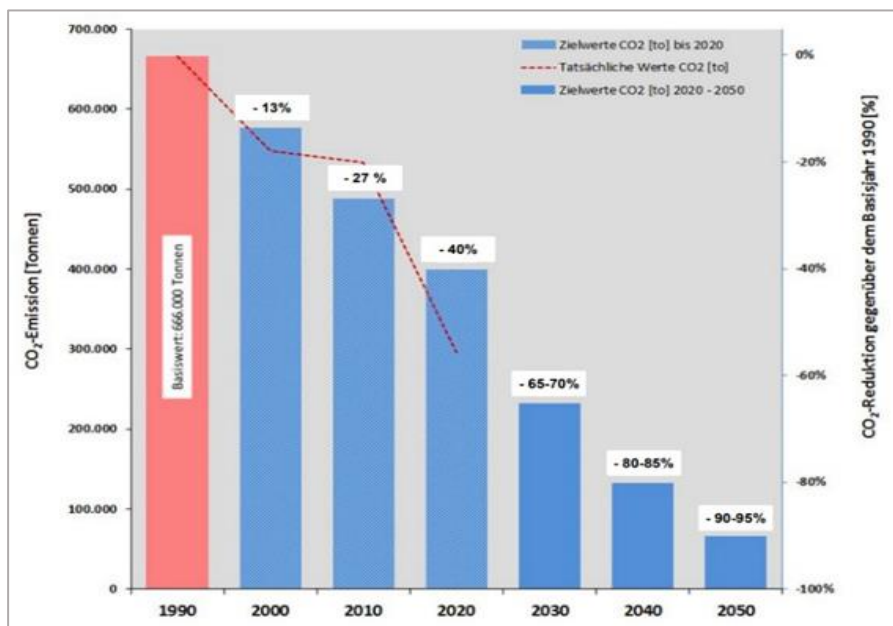


Abb. 10: Zielpfad für den CO₂-Ausstoß bis 2050 für Landesbauten (aus MUK BW 2020a)

Die signifikanten Einsparungen der CO₂-Emissionen sind damit nicht etwa auf eine Verbrauchsreduzierung zurückzuführen. Die Realisierung des Klimaschutzes wurde vielmehr durch einen gesetzlich vorgeschriebenen energetischen Standard für Neubauten (ENEV) erreicht (s. Kapitel 3.4.) sowie auch durch die konsequente Erweiterung des Bezugs von erneuerbarer Energie (MUK BW 2020a). Im Bereich Stromversorgung hat der Ökostrombezug seit 2015 mit 100% für landeseigene Gebäude eine drastische CO₂-Einsparung bewirkt.

- ➔ Allerdings wurden niedrigere CO₂-Äquivalente für die Berechnung der CO₂-Emissionen des Landes Baden-Württembergs genutzt als sie in dieser Arbeit gewählt werden. Dadurch fallen die berechneten CO₂-Emissionen des Landes BW geringer aus. Das bestärkt das Einsparpotenzial der hier untersuchten erneuerbaren Energien ebenfalls.

Tab. 5: Entwicklung der CO₂-Emissionen in t (MF BW 2020a)

CO ₂ -Emissionen [t]		1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
aus Wärmeverbrauch		467.993	439.867	348.079	301.246	291.321	236.050	237.751
aus Stromverbrauch		197.873	188.643	199.661	216.111	247.113	120.964	47.714
Gesamtemissionen		665.866	628.510	547.740	517.357	538.434	357.013	285.465

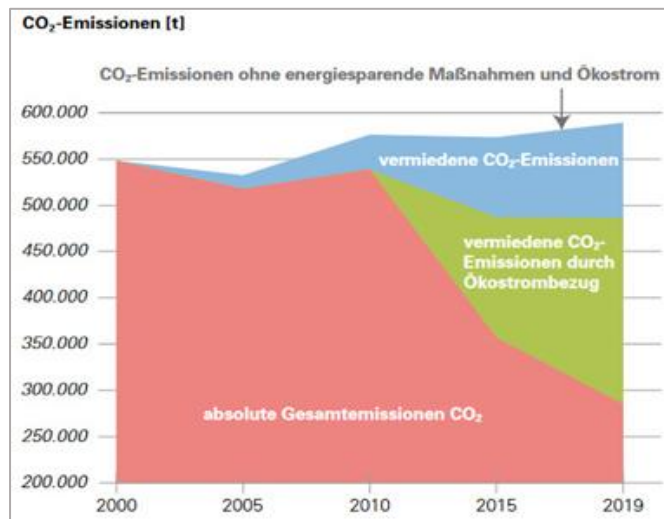


Abb. 11: Auswirkungen klimaschützender Maßnahmen auf CO₂-Emissionen (MF BW 2020a)

Seit 2017 ist die Errichtung von Photovoltaik-Anlagen grundsätzlicher Bestandteil der Baumaßnahmen bei Neubauten. Bei bestehenden Landesbauten sind PV-Anlagen mindestens vorzubereiten, indem die Voraussetzungen für eine anschließende Errichtung geschaffen werden. Im bundesweiten Vergleich hat Baden-Württemberg beim Ausbau von PV-Anlagen auf landeseigenen Liegenschaften eine führende Rolle eingenommen. Die installierte PV-Fläche erreichte im Jahr 2018 insgesamt 103.000 m² auf Landesliegenschaften. Das festgelegte Ziel für 2020 von 104.000 m² installierte PV-Fläche wurde danach bereits 2019 erreicht:

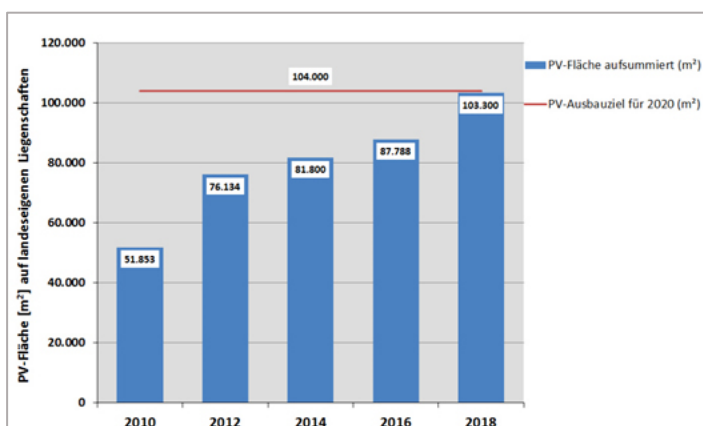


Abb. 12: Entwicklung der PV-Fläche auf landeseigenen Liegenschaften bis 2018 (MUK BW 2016)

Im Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzept 2021 (nach MUK BW 2016: 18ff) wird unter anderem die Einrichtung von onlinegestützten Monitoring-Systemen für die Aufschaltung **landeseigener PV-Anlagen über 10 kWp** nahegelegt, um neue PV-Anlagen aufzuschalten. Bei Anlagen unter 10 kWp wird eine mindestens monatliche manuelle Erfassung gewährleistet. Weiter wird bei der Errichtung von erneuerbaren

Energieanlagen wie Windkraft, Solar und Erdwärme und Bioenergie eher bei Neubauten empfohlen. In der Sanierungsfrage von Denkmal geschützten Gebäuden seien hinreichende technische Möglichkeiten vorhanden, sie Energieeffizienz zu fördern. Für einen Ausgleich sorgen die Effizienzhäuser, die nach neuen Vorschriften (GEG 2021) höchste bauliche und energetische Anforderungen an Neubauten stellen.

- ➔ **Die dargestellten Herausforderungen verdeutlichen die Diskrepanz zwischen den baulichen Möglichkeiten und Hindernisse und den durch erneuerbare Energien relativ leicht erbringbaren Nutzen in Richtung CO₂-Reduktion und Erreichen der Klimaschutzziele.**

3.3.1. Anreize für den Ausbau der erneuerbaren Energien

Die erneuerbaren Energien besitzen großes Potenzial zur Minderung des Klimawandels und bieten zudem weitreichende Vorteile für periphere Regionen. Über den Sektor Energie hinaus, bieten erneuerbare Energien weitreichende Potenziale in den Sektoren Gesundheit und Ernährung, da der Zugang zu Energien die Lebensbedingungen verbessert und neue Lebensstandards ermöglicht. Die negativen Auswirkungen auf die Umwelt sind geringer und es ergeben sich flexible Möglichkeiten zur Erzeugung von Elektrizität und Wärme durch heterogene Technologien:

- ➔ **Sie ist sowohl dezentral in ländlichem und städtischem Umfeld einsetzbar als auch zentral in größere Energienetze einzuspeisen.**

Dabei gilt die technologische Nutzung hinsichtlich Effizienz und Variabilität noch immer nicht als ausgereift und entwickelt sich am Markt stetig weiter. Die Geschwindigkeit des Ausbaus hing einerseits mit Faktoren wie Investitionsanreizen durch Einspeisevergütung und steuerlichen Vorteilen zusammen, andererseits mit einer wachsenden Akzeptanz für Energiegewinnungsanlagen wie Windkraft, Biogas und Photovoltaik in der Bevölkerung. Insbesondere gegenüber der Geothermie besteht weiterhin Skepsis, die nur durch umfassende Bürgerbeteiligungsprozesse und transparente Projektplanungen abgebaut werden.

In Abbildung 14 ist die Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland aufgeführt. Daran ist abzulesen, dass der Ausbau erneuerbarer Stromgewinnung seit 2005 von 10 % auf 36 % anstieg. Zugleich stieg der Verbrauch an Elektrizität mit an, sodass nur bei der Wärmeerzeugung ein leichter Energieeffizienzgewinn zu verzeichnen war, während der Sektor Verkehr bei 5 - 6 % stagnierte. Im Wärmesektor kommt den erneuerbaren Energien eine wachsende Bedeutung zu – beispielsweise bei der elektro-chemischen Wärmeerzeugung wie Power-To-Gas bzw. Liquid als Ersatz für Erdöl und Erdgas (Zech et al:2018).

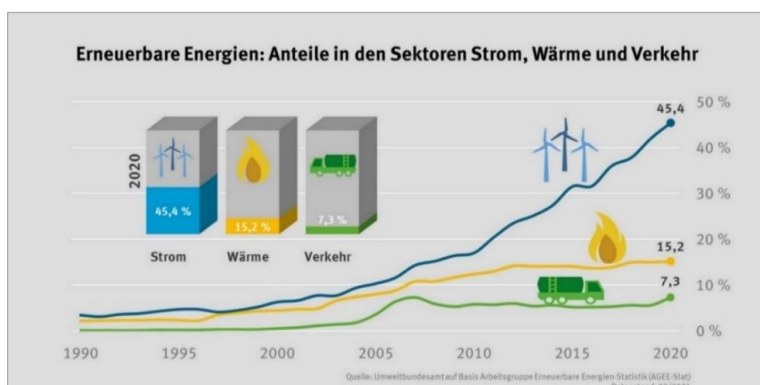


Abb. 13: Erneuerbare Energien: Anteil in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (UBA 2021a)

Werden die sinkenden CO₂-Emissionen mit dem steigenden Anteil erneuerbarer Energien in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr verglichen, so wird ein signifikanter Zusammenhang deutlich, denn: Seit dem Jahr 2005 nahm der Anteil an erneuerbaren Energien, insbesondere die Windkraft von ca. 10 % auf 45,4 % zu. In den Sektoren Wärme und Verkehr gelang dieser Ausbau nur bis zu einem Anteil von 15,2 % bzw. 5- 10 %. Betrachtet man die Verteilung der erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung gesondert, so wird deutlich, dass neben der Windkraft (Abb. 15) mittlerweile auch Biomasse und Photovoltaik einen großen Anteil einnehmen. Seit 2005 sind deren Ausbauraten stetig angestiegen. Die Verteilung der Stromerzeugung auf Basis von Biomasse, Photovoltaik und Geothermie sah in den Jahren von 1990 bis 2020 wie folgt aus:

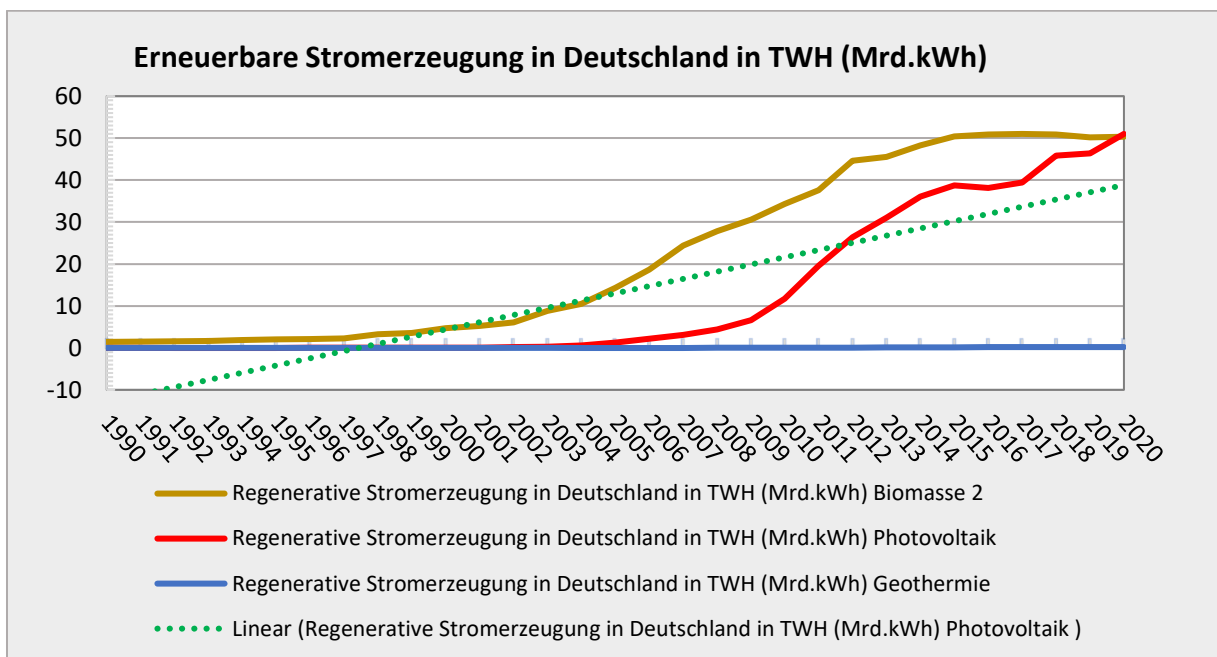


Abb. 14: Erneuerbare Stromerzeugung in Deutschland in TWH (Mrd. kWh) (eigene Darstellung nach Quaschnig 2020)

In einer detaillierten Darstellung (Abb.15) zu den Gesamtentwicklungen ist zusätzlich der lineare Trendverlauf der CO₂-Emissionen bis 2025 integriert. Diese Trendlinie zeigt den möglichen Verlauf der CO₂-Emissionen bis 2025, wenn diese, wie in den Jahren zuvor, weiterhin linear reduziert werden. In den Jahren 2008-2009 sind wirtschaftlich bedingte Minderungen der CO₂-Emissionen zu erkennen. Dies gilt, aufgrund der Corona-Pandemie, ebenso für das Jahr 2021. Für die Jahre nach der Pandemie wird, parallel zum Jahr 2010, ein Anstieg der CO₂-Emissionen auf den Vorkrisenstand erwartet, weil die die CO₂-Minderungen nicht auf grundlegende Strukturanpassungen durch verbesserte Produktionsprozesse zurückgingen, sondern die Folge von Lockdown- bzw. Stilllegungsmaßnahmen waren. Seither ist mit steigenden CO₂-Emissionen zu rechnen. In Abbildung 17 sind die energiebedingten CO₂-Emissionen, die Gesamt-CO₂-Emissionen, die Gesamt-Treibhausgasemissionen sowie die prognostizierte Trendlinie bis 2025 dargestellt:

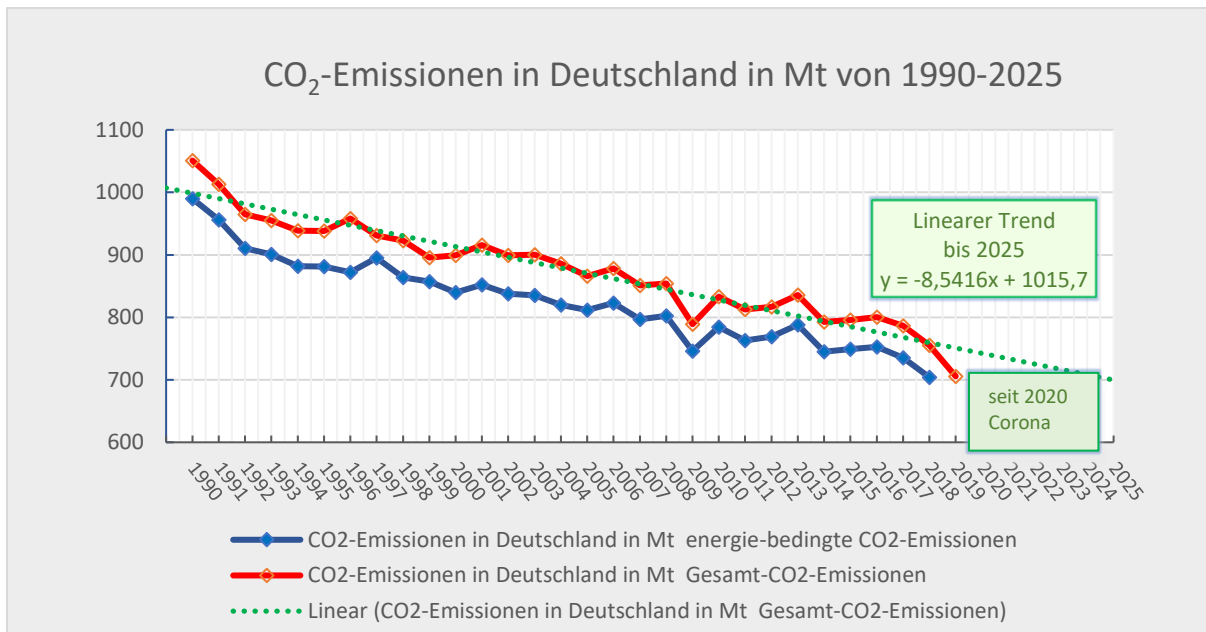


Abb. 15: Entwicklung der CO₂-Emissionen in Deutschland in Mt von 1990–2025 (Mrd. kg) (eigene Darstellung nach Wissenschaftliche Statistiken: Quaschnig 2020)

3.3.2. Die gesetzliche Grundlage für erneuerbare Energien (EE)

Eine Einordnung der gesetzlichen Grundlage für die Nutzung und den Ausbau erneuerbarer Energien zeigt die finanziellen Möglichkeiten auf, die inzwischen für Investitionen geschaffen wurden. Das **Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG)** wurde als Vorranggesetz erstmals im Jahr 1990 erlassen. Anschließend wurden in den neuen Fassungen der Jahre 2000, 2004 und 2009 Anreize zur Förderung erneuerbarer Energietechnologien formuliert, um Planbarkeit und Berechenbarkeit des gewünschten Transformationsprozesses zu gewährleisten. So wurde beispielsweise mit den Vergütungssätzen für die Einspeisung von Strom ins öffentliche Netz aus der Fassung von 2000 ein hoher Investitionsanreiz für Bürger und Unternehmen geschaffen. Mit dem Erlass des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) von 2009 wurde dann parallel das Erneuerbare-Energien-Gesetz-Wärme (EEWärmeG, MUK BW 2015) erlassen. Aktuell werden Laufzeitverlängerungen wegen der *Gas-Krise* diskutiert.

Seit den Krisenjahren 2007–2009 versprach die Erneuerbare Energien-Branche ein großes Potenzial für Wirtschaftswachstum und stellte einen „guten, dezentralen, mittelständischen, innovativen wirtschaftlichen Aufschwung“ dar, das Deutschland nutzen wollte (HERMANN, 2010:6). Zugleich sollte eine Stabilisierung des Euro entstehen. Mit weiteren Anpassungen im Baugesetzbuch, im Energiestatistikgesetz sowie in der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung überführte man die europäische Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Energien (EAG EE) in nationales Recht. Der Atomausstieg wurde stufenweise weiter vorangetrieben. Mit dem **Erneuerbare-Energien-Gesetz 2010** wurde dann die vollständige Dekarbonisierung der Stromerzeugung beschlossen, ohne die Klimaschutzziele nicht zu erreichen waren (APPELRATH et al., 2011).

Seit EEG 2010 stabilisierte sich die Investitionsbereitschaft durch die Gesetzesregelung für erneuerbare Energien (EEG). Förderprogramme zu Quotenregelung, Einspeisetarifen und Zertifikatshandel stärkten die

Bedeutung von erneuerbaren Energien, die Vorrangrolle blieb jedoch weiterhin aus. Die Subventionen stellten eine wichtige Anschubfinanzierung für den neuen Industriezweig dar, der bis 2014 Marktreife erreichte und Deutschland im Bereich der Schaffung und des Ausbaus erneuerbarer Energien noch eine weltweit führende Stellung verschaffte. Für den Arbeitsmarkt brachte dies im Jahr 2016 ca. 500.000 neue Arbeitsplätze (TUSCHINSKI 2016, BRD 2016a, BRD 2016b).

Das EEG 2016 reformierte das EEG 2010 in weiten Teilen. Im Jahr 2017 trat die Novelle des EEG 2016 in Kraft, die für neu installierte Photovoltaikanlagen eine Einspeisevergütung pro erzeugte Kilowattstunde für 20 Jahre zusicherte. Für jede eingespeiste Kilowattstunde Strom erhält der PV-Anlagenbetreiber vom Netzbetreiber einen bestimmten Betrag, der sich nach dem Jahr der Inbetriebnahme richtet und für 20 Jahre festgelegt wurde¹⁰. Die *Anschubfinanzierung* war zunächst für 6 Jahre festgelegt, um notwendige Investitionen in Forschung und Industrie zu erleichtern. Nach Ablauf der Frist sollte diese Form der Subvention dann langsam zurückgefahren werden, um die Branche dem marktwirtschaftlichen Wettbewerb zuzuführen. Hierfür sorgten die in EEG 2016 festgelegte *Selbstvermarktung der erneuerbaren Energien* sowie ein *Bestandschutz* für bisherige Energiestromversorger (TUSCHINSKI 2016, BRD 2016a, BRD 2016b).

Mit der „10-Punkte-Energie-Agenda“ des Jahres 2014 folgten Gesetze zum Strommarktdesign, zur Einbindung konventioneller Kraftwerke, zum Netzausbau, Emissionshandel sowie zur Energieeffizienz. Für die zeitliche Entwicklung wurde darin ein Stufenplan festgeschrieben, nach dem bis ins Jahr 2025 ein Anteil an Strom aus erneuerbaren Energien von 40 – 45 % erreicht werden sollte; im Jahr 2035 dann bereits 55 – 60 %. Mit dem geplanten Ausbau sowie der sich entwickelnden Technologie sanken die Kosten für erneuerbare Energien, sodass eine beschleunigte Integration in die Energieversorgungssysteme erfolgen konnte (s. Abb.14).

3.3.3. Die EEG-Einspeisevergütung und Umlage für erneuerbare Energien

Die Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) von 2017 legte monatliche Vergütungssätze fest, die für die eingespeisten Kilowattstunden gelten. Die Vergütungssätze wurden je nach Anlagenart, Größe und des Zeitpunkts der Inbetriebnahme definiert und wurden für 20 Betriebsjahre einer Solaranlage bis zum jeweiligen Jahresende garantiert. Die Höhe der Einspeisevergütung ist abhängig von der insgesamt installierten Leistung in ganz Deutschland. So ist der gesamte Brutto-Zubau von Photovoltaikanlagen maßgebend für die Entwicklung der Einspeisevergütung. Gesetzlich ist die stetige Senkung des Vergütungssatzes für Einspeisungen festgelegt. Monatlich nimmt die garantierte Einspeisevergütung für Neuanlagen um 0,5 % ab, sodass eine frühzeitige Installation begünstigt ist.

→ **Die aktuellen Vergütungssätze für Januar 2022 wurden nach der Degressionsberechnung (EEG 2021) festgelegt. Danach sind die anzulegenden Werte für die Vergütung von PV-Anlagen auf Wohngebäuden, Lärmschutzwänden und Gebäude gemäß § 48 Abs. 2 EEG 2021 anzuwenden (BNA 2021).**

¹⁰ Mit EEG (2016) wurden Vergütungen an Stromerzeuger nur noch ab einer installierten Leistung von 500 kW bezahlt.

Zum 1. Januar 2022 galten die Einspeisevergütungssätze für Photovoltaikanlagen für 20 Jahre gleichbleibend, die zu diesem Zeitpunkt erstmals einspeisen (EEG 2017¹¹)¹².

- 6,83 Cent/kWh bei Anlagen bis 10 kWp
- 6,63 Cent/kWh bei Anlagen von 10 bis 40 kWp
- 5,19 Cent/kWh bei Anlagen von 40 bis 100 kWp
- 4,67 Cent/kWh bei Anlagen bis 750 kWp

Vergütungssätze in Cent/kWh - Feste Einspeisevergütung:				
Inbetriebnahme	Wohngebäude, Lärmschutzwände und Gebäude (§ 48 Abs. 2 EEG)			Sonstige Anlagen bis 100 kW (§ 48 Abs. 1 EEG)
	bis 10 kW	bis 40 kW	bis 100 kW	
ab 01.01.2021 ⁴	8,16	7,93	6,22	5,61
ab 01.02.2021 ⁴	8,04	7,81	6,13	5,53
ab 01.03.2021 ⁴	7,92	7,70	6,04	5,44
ab 01.04.2021 ⁴	7,81	7,59	5,95	5,36
ab 01.05.2021 ⁴	7,69	7,47	5,86	5,28
ab 01.06.2021 ⁴	7,58	7,36	5,77	5,20
ab 01.07.2021 ⁴	7,47	7,25	5,68	5,12
ab 01.08.2021 ⁴	7,36	7,15	5,60	5,05
ab 01.09.2021 ⁴	7,25	7,04	5,51	4,97
ab 01.10.2021 ⁴	7,14	6,94	5,43	4,89
ab 01.11.2021 ⁴	7,03	6,83	5,35	4,82
ab 01.12.2021 ⁴	6,93	6,73	5,27	4,75
ab 01.01.2022 ⁴	6,83	6,63	5,19	4,67

4) Degressionsberechnung nach § 49 EEG 2021 (anzulegender Wert siehe oben abzgl. 0,4 Cent/kWh nach § 53 Abs. 1 EEG 2021)

Abb. 16: Degressionssätze Januar 2021 - Januar 2022 (BNA 2020)

Auch bei Senkung der Einspeisevergütung, besteht für den Erzeuger eine weitere Vergütungschance durch Direktvermarktung. Denn hier wurden höhere Einspeisevergütungen als durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz geschaffen. Zudem darf die Strompreisentwicklung den Investor in Solaranlagen für die Zukunft positiv stimmen. Denn Stromversorger sind gesetzlich zur Abnahme des erneuerbaren Stroms verpflichtet. Ein Vergleich des Strompreises für die Industrie (Abb.17) zeigt ähnliche Werte, die sich aus verschiedenen Kostenanteilen ergeben.

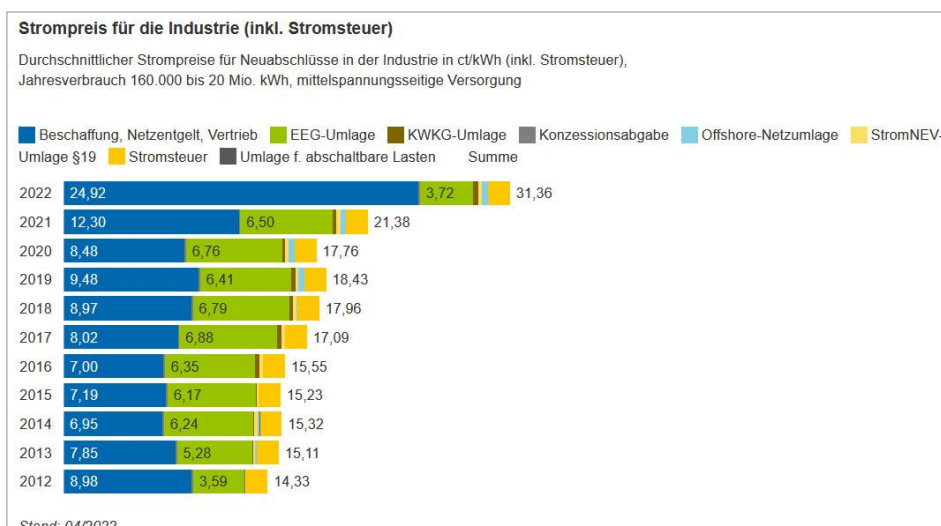


Abb. 17: Strompreis für die Industrie (BEW 2022:13)

¹¹ Degressionsberechnung nach § 49 EEG 2017 Abs. 3 in Abhängigkeit vom Zubau nach Neufassung des § 49 Abs.

¹² Dies wird bei den Berechnungen der EEG-Einspeisevergütung pro Teildachfläche berücksichtigt (s. Digitaler Anhang, Berechnungstabellen).

¹³ Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., verfügbar unter: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>, abgerufen am 28.5.2022.

In der Berechnung der Preise pro Energieeinheit in dieser Arbeit sind ausschließlich die Anfangsinvestitionen, Betriebskosten und Zusatzkosten berücksichtigt. Weitere Anteile wie die EEG-Umlage, Steuern und Netzentgelte sind nicht einkalkuliert. Einzelne Posten sind separat ausgewiesen (EEG-Umlage, EEG-Einspeisevergütung, CO₂-Steuersätze).

Seit 2022 wurde im Bundestag die Abschaffung der **EEG-Umlage** diskutiert, womit diese Kosten für den Verbraucher wegfallen würden. Bisher wurden über die EEG-Umlage die Kosten für den Netzbetreiber an den Endkunden weitergegeben. Jeder Stromverbraucher in Deutschland ist bisher an den Kosten des Zubaus von Photovoltaikanlagen beteiligt. Die Höhe der EEG-Umlage hängt vom Gesamtstromverbrauch in Deutschland ab. Wenn dieser höher ist, steigt auch die Höhe der EEG-Umlagezahlung an. Das bewirkte einen niedrigen EEG-Umlagesatz, der für alle Stromverbraucher gleichermaßen angewendet wurde. Die Höhe der EEG-Umlage wird von den Übertragungsnetzbetreibern auf Basis gutachterlicher Prognosen festgelegt. Die Bundesnetzagentur überwacht die ordnungsgemäße Ermittlung. In Tübingen sind die Stadtwerke Tübingen für die Festlegung zuständig.

Nach aktuellen Diskussionen der Bundesregierung soll die EEG-Umlage ab 2023 abgeschafft werden, um die Nutzung von erneuerbaren Energien stärker zu fördern und um soziale Aspekte zu berücksichtigen. Da Energieverbrauch zum Grundbedarf zählt, müssen Stromkosten regressiv betrachtet werden, was bedeutet, dass in ärmeren Haushalten ein größerer Anteil des Nettoeinkommens für Strom ausgeben werden muss als in reicheren Haushalten. Zu diesem Problem kommen noch die beschränkten Anpassungsmaßnahmen ärmerer Haushalte an klimafreundliche Technik, was bei diesen zu zusätzlichen Energiekosten beispielsweise in Form von CO₂-Abgaben führt. Es wird deshalb – um die Energiewende zu fördern – eine gerechte und langfristige Energiesteuer verlangt, die sich an Verursachern und Hauptinvestoren orientiert (nach Löschel et al. 2021). Die Entwicklung der EEG-Umlage zeigt nachstehende Darstellung:

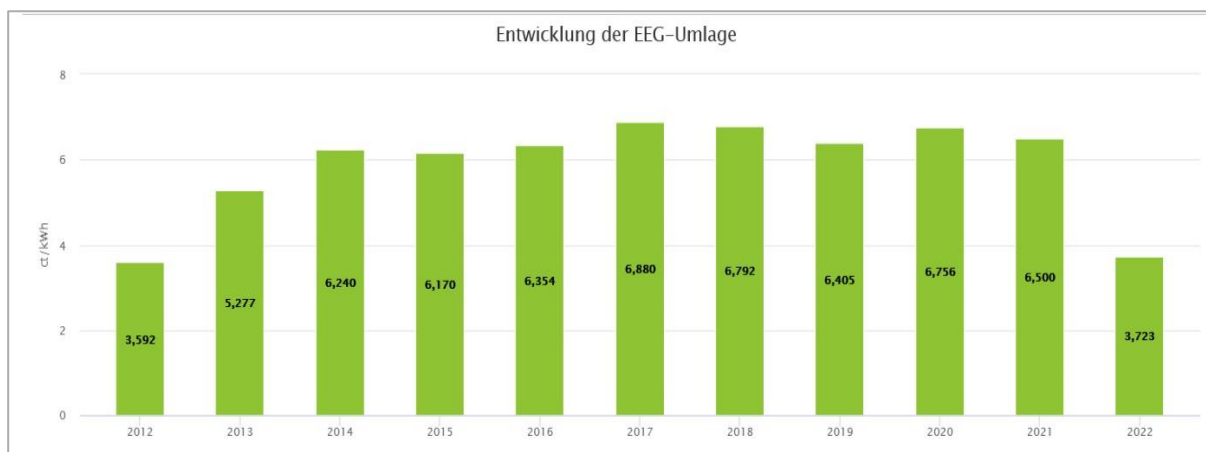


Abb. 18: Entwicklung der EEG-Umlage 2012-2022 (BMW 2018 + BNA 2020)

Die EEG-Umlage entwickelte sich in den Jahren 2012 bis 2022 von anfangs 3,6 ct/kWh auf einen Maximalwert von 6,8ct/kWh (2017) und sank bis heute wieder auf 3,7 ct/kWh (Abb. 18, BMJV 2017). Im Jahr 2020 lag die Umlage bei 6,756 ct/kWh. Während der Corona-Pandemie nahmen die Einnahmen aus der Umlage 2020 ab, da der Stromverbrauch stark sank. Zudem sanken die Einnahmen aus dem Verkauf des erneuerbar produzierten Stroms an der Börse durch den sinkenden Großhandelspreis. Durch das Corona-Konjunkturpaket bezuschusste der Bund das Defizit und verhinderte damit den Anstieg der Umlage. Zugleich

wurde die Abschaffung der EEG-Umlage ab 2023 diskutiert und ein Zubau durch Solaranlagen vorangetrieben (BNA 2020).

Wie in den vergangenen Jahren enthielt die EEG-Umlage auch in 2022 eine Liquiditätsreserve, die als Absicherung gegen negative Kontostände durch sinkende Börsenstrompreise und gegen Liquiditätsrisiken diente. Für das Jahr 2022 rechneten die Übertragungsnetzbetreiber mit einem Netto-Zubau von Erneuerbaren-Energien-Anlagen in Höhe von 8,2 GW. Ein Großteil des Netto-Zubaus wurde erneut durch Solaranlagen getrieben.

Nach dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEG-WärmeG), das seit 2009 gilt, wird unter anderem die Minderung der Abhängigkeit von Energieimporten gefördert. Dabei verpflichtete das EEG-WärmeG, Eigentümer ab einer Nutzfläche von > 50 m² zur Nutzung von erneuerbaren Energien. So muss ein bestimmter Mindestanteil des gesamten Wärme- und/oder Kältebedarfs mit erneuerbaren Energien erzeugt werden z.B. Geothermie. Ebenso können Ersatzmaßnahmen durch konventionell erzeugte Fernwärme oder Fernkälte und durch eine verbesserte Energieeinsparung beim Gebäude erzielt werden (§ 7 Abs. 2 und 3 EEWärmeG). Dies trifft auf die Universität Tübingen zu, die Fernwärme der Stadtwerke Tübingen bezieht, da für öffentliche Gebäude die Pflicht zum Einsatz erneuerbarer Energien besteht. So wurde durch das Marktanzreizprogramm eine Austauschprämie für Ölheizungen mit Investitionszuschüssen von bis zu 45 % aufgenommen (ebd.). Dies begünstigt die Investitionen in geothermische Anlagen.

Zwar besteht noch keine Einspeisevergütung für geothermische Wärme, jedoch erhöhte sich die Einspeisevergütung für Strom aus Geothermie. Im Jahr 2004 betrug die Einspeisevergütung 15 ct/kWh, 2009 waren es 25 ct/kWh, was den Geothermiesektor bis 2018 von 3 MW elektrische Leistung auf 40,5 MW_{el} ansteigen ließ. Die Vergütung für Strom aus Geothermie betrug 2020 noch 25,20 ct/kWh. Die positiven Auswirkungen lagen in der Investitionsbereitschaft. Damit sank die EEG-Umlage für Geothermie auf 0,0095 ct/kWh, deren Anteil der Geothermie 0,14 % beträgt. Seit der Erhöhung der EEG-Vergütung auf 25 ct/kWh für Strom aus Geothermiekraftwerken hat sich auch die installierte Wärmeleistung auf 335 MWh verdreifacht. Die Umlage betrug 2022 noch 0,003 ct/kWh (2021: 0,009 ct/kWh) (ebd.).

Für die meisten kombinierten Geothermieanlagen wird die Anfangsinvestition über das EEG refinanziert, da sofort finanzielle Rückflüsse generiert werden, während das Fernwärmenetz ausgebaut wird und die thermische Leistung zunimmt. Durch die kombinierte Nutzung konnten auch jene Wärmeprojekte realisiert werden, deren Finanzierung sonst nicht gesichert gewesen wäre. Auch hier gelten privilegierte Begünstigungen für Letztverbraucher. Die Höhe der von den privilegierten Unternehmen zu zahlenden EEG-Umlage:

- EEG-Umlage in voller Höhe: Stromverbrauch bis 1 GWh
- 15 % der EEG-Umlage für Verbräuche >1 GWh, aber mindestens 0,1 Cent/kWh
- Für Strommengen >1 GWh wird die zu zahlende EEG-Umlage in Summe aller begrenzten Abnahmestellen des Unternehmens auf 0,5 % der Bruttowertschöpfung begrenzt, sofern die Stromkostenintensität des Unternehmens mindestens 20 % betragen hat bzw. 4,0 % der Bruttowertschöpfung.

Dies gilt, wenn die Stromkostenintensität des Unternehmens weniger als 20 % beträgt (sogenanntes "Cap" und "Super-Cap" der Umwelt- und Energiebeihilfeleitlinien) (vgl. BNA 2020). Wenn eine Anlage die Voraussetzungen der Förderprogramme von KfW und BafA erfüllt, können weitere Bezuschussungen

einkalkuliert werden. Beispielsweise werden Eisspeicher und gedämmte Erdwärmespeichersysteme gefördert, die ein Mindestspeichervolumen einhalten und eine Systemjahresarbeitszahl (SJAZ) von 4,1 nachweisen können. Weitere Boni können für Sanierungsmaßnahmen beantragt werden wie bzw. einer Kombination aus Photovoltaik oder Solarthermie mit einer oder mehreren Erdwärmesonden. Dies ist in weiterführenden Arbeiten zu prüfen.

3.3.4. Positive Effekte erneuerbarer Energien auf CO₂-Emissionen

Mit Blick auf die Entwicklungen der CO₂-Emissionen vor dem Hintergrund des Ausbaus erneuerbarer Energien wird der Zusammenhang schnell augenfällig. In einer Gesamtbetrachtung von 1990 bis 2018 in der BRD gingen die CO₂-Emissionen um 200 Mio. t (21 %) zurück. In der ersten Leitstudie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV 2008: 46 ff) wurde die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien auf 30 % des Bruttostromverbrauchs (189 TWh/a) bis ins Jahr 2020; bis auf 50 % im Jahr 2030 simuliert.

Ein Rückblick auf die Entwicklungen der CO₂-Emissionen zeigt bereits Phasen des Rückgangs, verbunden jeweils mit wichtigen Ereignissen der Geschichte, die sich auf die Wirtschaft auswirkten. So konnte in Deutschland während der deutschen Wiedervereinigung Anfang der 1990er-Jahre eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen festgestellt werden. Ein weiterer Rückgang von ca. 11 % der Gesamtemissionen zwischen 1990 und 1995 wird dabei auf den wirtschaftlichen Umbruch in den neuen Bundesländern zurückgeführt. In den alten Bundesländern nahmen die Treibhausgasemissionen in diesen Jahren wieder zu. Seit dem Jahr 2000 wurde erneut ein Rückgang der CO₂-Emissionen festgestellt, der mit dem Einsatz erneuerbarer Energien sowie der Nutzung emissionsärmerer Energieträger in Verbindung gebracht wird. Auch während der Wirtschaftskrise 2008–2009 gingen die Emissionen stark zurück, stiegen jedoch im Jahr 2010 wieder an.

Da in Deutschland ca. 90 % aller Treibhausgasemissionen aus CO₂ bestehen, spielen andere Gase eine untergeordnete Rolle. Wiederum über 90 % der gesamten CO₂-Emissionen werden durch die Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas verursacht. Die folgende Grafik zeigt die Entwicklung der CO₂-Emissionen in Deutschland während den erwähnten Ereignissen – verglichen mit den festgelegten Zielen der Bundesregierung (QUASCHNING 2020). Darin sind die Entwicklungen während der Corona-Pandemie nicht berücksichtigt:

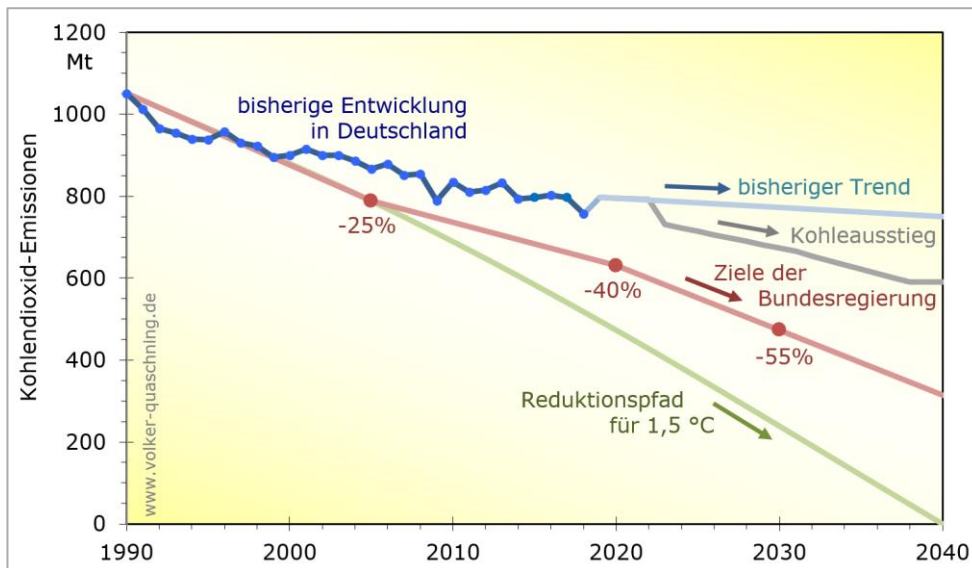


Abb. 19: CO₂-Emissionen in Deutschland (Quaschnig 2020)

Die Darstellung der CO₂-Entwicklungen in den letzten 40 Jahren wirft die Fragen auf, wie viele Emissionen noch verursacht werden dürfen, um sich innerhalb der gesetzten Klimaschutzziele zu bewegen. Der Anstieg der globalen CO₂-Emissionen lag 2007 bei 30 Mio. t. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden 1.000 Mrd. t CO₂ in die Atmosphäre emittiert, wovon 80 % in den letzten 60 Jahren ausgestoßen wurden. Die globale Erwärmung sollte gebremst werden, indem die 360 ppm bis zum Ende des Jahrhunderts auf maximal 450 ppm (Parts per Million) steigen würden. Die kritische Grenze liegt bei maximal 550 ppm (DROEGE 2013, QUASCHNING 2020).

Prognosen der Jahre 2015 - 2018 gingen davon aus, dass ohne weitere Maßnahmen bis 2020 nur eine Emissionsminderung von 33 - 40 % erreicht werden konnte (UBA 2017). Das Ziel lag 2020 allerdings bei 40 % im Vergleich zu 1990 sowie der Erfüllung der Sektorziele 2030 des Klimaschutzplans 2050. Aktuelle Prognosen zeigen auf, dass sich insbesondere im Verkehrssektor eine Minderungslücke von 61 Mio.t CO₂-Äquivalenten abzeichnet. Im Gebäudesektor beträgt die Minderungslücke für 2030 ca. 12 Mio.t CO₂-Äquivalenten. Damit stehen mindestens 80-100 Mio. t CO₂-Minderung bis 2030 aus (MUK BW 2016, UBA 2008a, UBA 2008b, UBA 2008d, UBA 2019c).

3.3.5. Emissionshandelssystem für Treibhausgase

Mit den definierten Klimaschutzziele zur Einsparung von Treibhausgasen wurden Kontrollsysteme erforderlich, die eine nachweisbare Messung der Treibhausgase gewährleisten und zugleich auf den gültigen Referenzwerten beruhen. Bereits seit 1966 wurden Konzepte für einen Emissionsrechtehandel zur Regulierung des Treibhausgasausstoßes veröffentlicht. Wegen des erschwerten Einigungsprozesses innerhalb der Vereinten Nationen entstanden national begrenzte Emissionshandelssysteme wie beispielsweise in den USA und in Kanada. Unternehmen verpflichteten sich dort zu einer Treibhausgassenkung von 6 %. China und Australien entwickelten eigene, vergleichbare Ansätze auf nationaler Ebene. Auch in Dänemark und Großbritannien bestanden eigene Handelssysteme zur Selbstregulierung und Kontrolle der Emission von Treibhausgasen (HÜBNER, 2013:5 ff).

Vor diesem Hintergrund entschied man sich innerhalb der Vereinten Nationen für ein Emissionshandelssystem, das global Anreize schaffen würde, die Investitionsbereitschaft der Wirtschaft in langfristige Klimaschutzmaßnahmen zu steigern. Der globale Energieverbrauch sollte vom Wirtschaftswachstum entkoppelt werden. Dies sollte durch eine technologische Effizienzsteigerung erreicht werden, was zugleich den Vorteil hatte, das globale Wirtschaftswachstum zu erhalten. Dieser Effekt ist besonders für Entwicklungs- und Schwellenländer von großer Bedeutung (ICAP 2018, IPCC 2014, FRITSCH 2018b, RANSON & STAVINS 2013, UN 2016).

Neben dem Emissionshandelssystem der Vereinten Nationen gilt zugleich das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS). Für Deutschland ergeben sich daraus zwei geltende Verpflichtungserklärungen. Die Herausforderung eines weltweiten Systems lag – neben der Zertifikatsvergabe an Emittenten – auch in der Regulierung von Wettbewerbsverzerrungen, der Einschränkung von Mitnahmeeffekten, der Intervention im Falle von Korruption und Betrug sowie in der Gestaltung umfassender Emissionshandelsgesetze. Die Instrumente zur Durchsetzung klimaschützender Maßnahmen orientieren sich dabei am Europäischen Emissionsrechtehandelssystem (EU-EHS), das seit 2005 gilt. Darin weist das Europäische Parlament die Mitgliedstaaten an, ihre Treibhausgas-Emissionen werden jährlich auszuweisen und verlangt von EU-Unternehmen zugleich eine Emissionsminderung¹⁴. Den Teilnehmerstaaten Emissionszertifikate, sogenannte Assigned Amount Units (AAUs), zugeteilt, für welche das European Union Emission Trading System (EU ETS) wiederum einen Marktpreis pro Tonne CO₂ festlegt. Die gesetzliche Regelung beinhaltet die Begrenzung des CO₂-Ausstoßvolumens der CO₂-Emittenten durch behördliche Zuteilung von Berechtigungszertifikaten (IPCC-Guidelines 1996).

Um die Anzahl der erforderlichen Menge an CO₂-Zertifikaten für einen CO₂-Emittenten zu ermitteln, wird die CO₂-Emission einer bestimmten Produktion herangezogen. Die Zuteilung der beantragten CO₂-Zertifikate erfolgt für 5 Jahre. Sollten die tatsächlichen CO₂-Emissionen eines Unternehmens dann höher ausfallen, als es die zugeteilten CO₂-Zertifikate erlauben, müssen fehlende CO₂-Zertifikate – z. B. aus Klimaschutzprojekten – eingekauft werden. Die Schwierigkeiten bei der Regulierung des Preises für Emissionszertifikate hatten sich in der 3. Handelsperiode 2013 jedoch zugespitzt. Es zeigte sich, dass eine Regulierung des Marktes über den Zertifikatshandel nicht ausreicht, um eine Emissionsreduzierung durch gezielte Investitionen anzuregen. Deshalb stiegen ab dem genannten Zeitraum wichtige teilnehmende Industriestaaten sukzessive aus dem Klimaabkommen aus (FICHTNER 2005, BÄRWALDT et al. 2009).

Nach einem Blick auf die europäische Ebene soll der Fokus im Folgenden nun auf die Darstellung des geltenden Systems in Deutschland gerichtet werden. In Deutschland hat die Schaffung erster gesetzlicher Regelungen in den 1990er-Jahren mit der Mineralölsteuer 1991 begonnen. Es folgte das Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG) 2000; erweitert durch das Gesetz zur Fortentwicklung der Ökologischen Steuerreform 2003 und der Niederspannungsanschlussverordnung (NAV) von 2006, dem *Energiebetriebene Produkte Gesetz* (EBPC) von 2008 sowie der Novellen zur Kraftwärmekopplung und der Förderungen erneuerbarer Energien im Jahr 2009 hat die Bundesregierung als rechtliche Grundlage das Treibhausgasgesetz (TEHG) und das Zuteilungsgesetz (ZUG) mit Zuteilungsverordnungen erlassen. In Deutschland werden die Emissionsgrenzen durch das Bundes-Emissionsschutzgesetz geregelt. Die Deutsche Emissionshandelsstelle (DEST) ist den Ministerien zugeordnet und bewilligt die CO₂-Zertifikate kostenlos. Das

¹⁴ Die international gültigen Referenzwerte (Stand 2014) für das relative Treibhauspotenzial der *Kyoto Gase* werden ausschließlich mit CO₂-Werten angegeben. Siehe 3.4.4.

Zuteilungs- und Überwachungsverfahren ist in Deutschland zugleich auch ein Abrechnungsverfahren. Dabei wird das Volumen an erforderlichen CO₂-Zertifikaten eines Emittenten innerhalb einer Handelsperiode von ebenfalls 5 Jahren ermittelt (UBA 2008b; UBA 2018b). Der Zertifikatspreis nahm von 2008 (23,16 €) bis 2015 (7,35 €) um mehr als zwei Drittel ab (UBA 2018).

Da Deutschland ca. 3 % des gesamten Weltausstoßes verursacht, leitet sich das nationale Ziel ab, die CO₂-Emissionen langfristig um ein Fünftel zu reduzieren. Laut einer Veröffentlichung des Umweltbundesamtes (UBA 2015) stehen Deutschland in den einzelnen Handelsperioden jeweils 499 Mio. t CO₂/a (1. Hp), 449 Mio. t CO₂ (2. Hp) Mio. t, 416 Mio. t CO₂ (3. Hp) des Emissionshandels zur Verfügung, um innerhalb des europaweiten Gesamtbudgets (CAP) zu bleiben.

Als Ergänzung der Simulationen einer erreichbaren CO₂-Minderung durch Steigerungen des Anteils an erneuerbaren Energien zeigt Abbildung 20, wie viel Emissionen verglichen mit den bereits Emittierten noch übrigbleiben, wenn das Erwärmungsziel um maximal 1,5 - 2° C eingehalten werden soll (s. Abb.22). Wirft man einen Blick auf die noch erlaubten CO₂-Emissionen für Kraftwerke, die das Öko-Institut errechnet hat, dann stellen sich die Anforderungen an die CO₂-Senkung wie folgt dar (Quelle: Öko-Institut e.V. Berlin 2019):

- Weltweit dürfen 890 Mrd. t CO₂ ausgestoßen werden, um max. 2° C Erderwärmung einzuhalten,
- davon stehen deutschen Kraftwerken insgesamt 4 Mrd. t CO₂-Ausstoß zu (2018-2035),
- der Jahresausstoß in Deutschland lag 2020 bei 350 Mio. t CO₂. Er ist auf ca. 150 Mio. t CO₂ (2020-2050) zu reduzieren.

Seit dem 1. Januar 2021 gilt in Deutschland das **nationale Emissionshandelssystem (nEHS)**, das den CO₂-Preis für die Sektoren Wärme und Verkehr auf nationaler Ebene festlegt. Danach muss ein Emissionszertifikat („nEHS-Zertifikat“) erworben und im Register für den Nationalen Emissionshandel (nEHS-Register) bei der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) im UBA abgegeben werden. Der erste Festpreis beträgt 25 Euro (2021) für 1 Tonne CO₂ 25 und wird bis 2025 schrittweise auf 55 Euro ansteigen. Bis 2026 bleibt die Anzahl der verfügbaren nEHS-Zertifikate unbegrenzt, danach geht das System in ein Versteigerungssystem über (UBA 2021b).

Das deutsche Klimaschutzgesetz vom 31. August 2021 schreibt nun die Treibhausgasneutralität bis 2045 für Deutschland vor. Um das 1,75 °C noch zu erreichen, darf Deutschland seit 2020 noch insgesamt 6,7 Gigatonnen CO₂ verursachen. Studien des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU 2022) belegen, dass eine gleichbleibende jährliche Emissionsminderung in Deutschland bis ins Jahr 2038 zur Treibhausgasneutralität führen kann. Allerdings bestünde dann immer noch eine Restemission von 4,3 Gigatonnen, die für das 1,5 °C-Ziel zu vermeiden seien (SRU 2022).

- ➔ **Daraus lässt sich ableiten: Die Reduktion des jährlichen Gesamtausstoßes sowie die Reduktion im Sektor Energie bestimmen die Erreichung der Klimaschutzziele.**
- ➔ **Dafür ist eine genaue Messung der Emissionen ausschlaggebend, was wiederum standardisierte Messverfahren erfordert.**

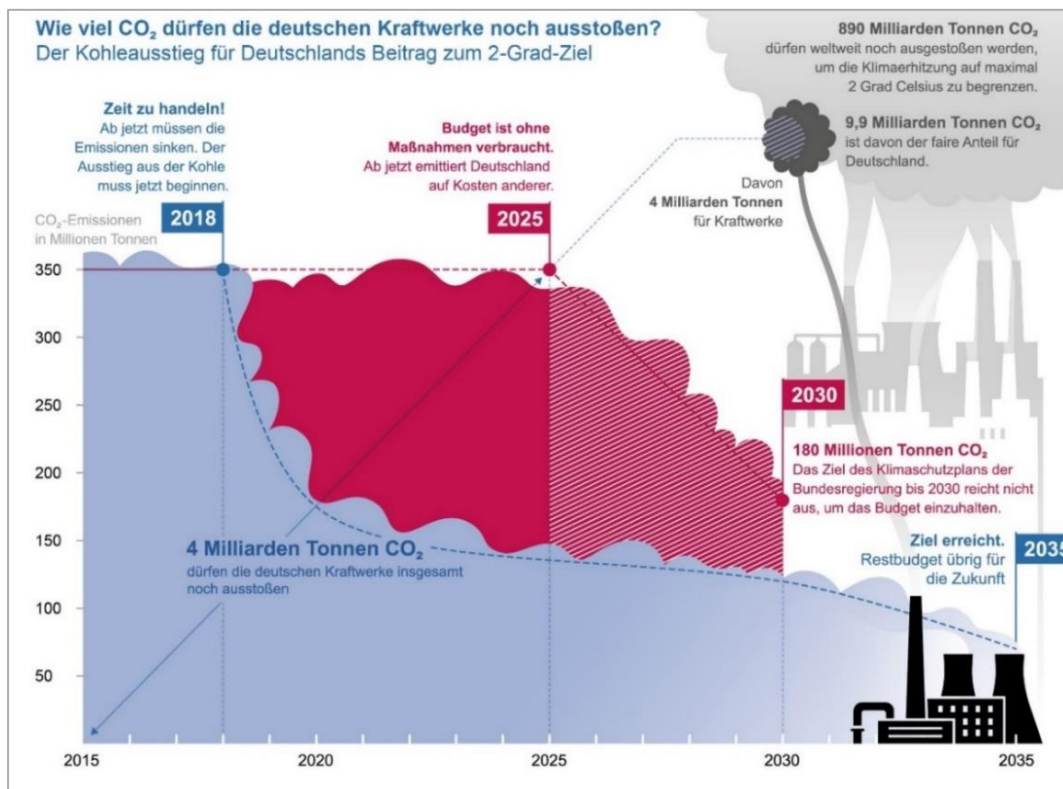


Abb. 20: Wie viel CO₂ dürfen die Deutschen Kraftwerke noch ausstoßen? Der Kohleausstieg für Deutschlands Beitrag zum 2°-Ziel? (Öko-Institut 2019)

3.3.6. Die Ermittlung von CO₂-Emissionen durch geltende CO₂-Äquivalente

Für die Erwärmung des Erdklimas sind in unterschiedlichen Anteilen die von der UN-Klimakonferenz 1995 in Kyoto festgelegten *Kyoto-Gase* verantwortlich. Von diesen *Kyoto-Gasen* wiederum gilt Kohlendioxid (CO₂) als Hauptverursacher der Klimaerwärmung, da es mengenmäßig klar dominiert. Jedoch besitzen die Gase CH₄, N₂O, SF₆, FKW und HFKW eine höhere klimaschädigende Wirkung (IPCC 2007, IPCC 2014, IINAS 2014). Die international gültigen Referenzwerte (Stand 2014) für das relative Treibhauspotenzial der Kyoto-Gase werden ausschließlich mit CO₂-Werten angegeben, alle weiteren Kyoto Gase bleiben in dieser Arbeit unberücksichtigt. Kohlendioxid (CO₂) bildet daher als bekanntestes Treibhausgas den Referenzwert für die Bewertung des relativen Treibhausgaspotenzials (THP), des *Global-Warming-Potentials (GWP)*.

Tab. 6: Auflistung der CO₂-Äquivalente (IPCC 2014)

Gase	Relatives Treibhauspotenzial Werte nach IPCC (2014)	
CO ₂	Kohlendioxid	1
CH ₄	Methan	21
N ₂ O	Lachgas	310
H-FKW	Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe	140–11.700
FKW	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe	6.500–9.200
SF ₆	Schwefelhexafluorid	23.900

Bemessen am jeweiligen Beitrag eines Gases am gesamten Treibhauseffekt wird ein CO₂-äquivalenter Wert des CO₂-Moleküls in g/kWh ermittelt. Der Wert des CO₂-Äquivalents ergibt sich aus der Multiplikation des relativen Treibhauspotenzials mit der Masse des jeweiligen Gases, welche dem CO₂ entspricht. Die darin aufgeführten Default-Werte für Oxidationsfaktoren wurden jeweils aus den verbliebenen Kohlenstoffgehalten in den Reststoffen fossiler Brennstoffe bestimmt (JÄHRLICH, 2016:30).

Das ifeu-Institut veröffentlichte bereits 2007 eine Vergleichsstudie zu unterschiedlichen CO₂-Emissionsrechnern, worin die Herangehensweise, die Kennzahlen und CO₂-Äquivalente verglichen wurden (UBA 2009). Das Öko-Institut Berlin – eines der europaweit führenden, unabhängigen Forschungs- und Beratungseinrichtungen – hat hierfür die Referenzwerte festgelegt, die bei der Ermittlung der CO₂-Emissionen, einschließlich der Vorketten zu berücksichtigen sind (ÖKO-Institut, 2019). Die Lebenswegbilanzen umfassen die vollständige Primärenergie- und Rohstoffgewinnung bis zur Nutzung des Energieträgers; inklusive den Hilfsenergien und dem Materialaufwand zur Herstellung von Anlagen und Transportsystemen sowie einschließlich der Entsorgung bis zur Sekundär- bzw. Endenergiestufe. Ähnliche Studien sind von Huneke (2017), Kahl (2017) und Jährlich (2016) erschienen. Neben den offiziellen Veröffentlichungen der Vereinten Nationen, der Europäischen Union, den nationalen Werten in Deutschland sowie schließlich der lokalen Zahlen für Baden-Württemberg ermitteln Forschungsinstitute neue Werte aufgrund zunehmender Erkenntnisse über die Einflüsse durch Lebenszyklusanalysen und Produktionsketten. Die letzte umfassende Veröffentlichung des *Globalen Emission Modells Integrierter Systeme* (GEMIS) wurde 2014 erlassen und zeigt bei manchen Werten noch keine Aktualisierung. Im Jahr 2018 wurden nur einzelne Werte angepasst sowie neue Berechnungsmethoden von GEMIS veröffentlicht.

Europaintern legen die Länder aufgrund unterschiedlicher Produktionsmethoden stark abweichende CO₂-Werte für Energieträger fest (HUNEKE 2017, KAHL 2017, JÄHRLICH 2016). Die Genauigkeit von CO₂-Äquivalenten hängt dabei vom Grad der Vollständigkeit bei der Erfassung von verursachenden Faktoren ab. Aus diesem Grund – der fehlenden Genauigkeit bei der Bemessung – werden viele CO₂-Bilanzen weiterhin kritisch betrachtet, wenn Reduktionserfolge nur verlässlich werden können. Mittlerweile wurden die CO₂-Bilanzierungen konkretisiert, sodass die komplexen Berechnungen zu genaueren Ergebnissen führen. Das wurde unter anderem durch aktuelle Studien zu Netto-Energiebilanzen bestätigt. Danach seien CO₂-Bilanzierungen nur dann zuverlässig und objektiv, wenn die CO₂-Menge bzw. die verbrauchte Energiemenge proportional zur eingesetzten Brennstoffmenge ist. Hier sei zwischen Einmalaufwendungen wie beim Bau eines Kraftwerks oder bei der Herstellung von Solarzellen zu differenzieren. Weiter wurde die Lebensdauer eines Kraftwerks herangezogen und auf die erzeugte Strommenge umgelegt. Eine verlängerte Laufzeit wurde dabei auf eine größere Stromgewinnungsmenge verteilt, was zu einer günstigeren CO₂-Bilanz führte (HUNEKE 2017, KAHL 2017, JÄHRLICH 2016).

Das Umweltbundesamt (UBA 2021a) erfasste über das *Zentrale System Emissionen (ZSE)* alle Bereiche der Strom- und Wärmeerzeugung und den Einsatz erneuerbarer Energien. Insbesondere für die Ermittlung der CO₂-Vermeidung bzw. der Emissionseinsparung durch erneuerbare Energien sowohl bei CO₂ (der Stromgewinnung (Wasserkraft, Photovoltaik, Geothermie etc.) als auch bei der Wärmeerzeugung (biogene flüssige Brennstoffe, Solarthermie, Geothermie, etc.) werden alle Energietechniken einzeln bewertet. In der Literatur werden unterschiedliche Emissionsfaktoren untersucht, weshalb unterschiedliche Ermittlungsmethoden bestehen.

In einem Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes wurde Ende der 1990er-Jahre der sogenannte **kumulierte Energieverbrauch (KEV)** eingeführt. Der KEV steht für eine Aufsummierung aller Primärenergieinputs. Er schließt auch die Materialherstellung ein. Allerdings wird das Energiepotenzial von Brennstoffen nicht berücksichtigt. Um eine Kompatibilität mit den Energiebilanzen der United Nations (UN), International Energy Agency (IEA), von EUROSTAT (Statistische Amt der Europäischen Union) und DESTATIS (Statistisches Bundesamt der BRD) herzustellen, wurde beim KEV weiterhin von einem Nutzungsgrad von 100 % bei jeder Primär-Energiegewinnung (z. B. Bergbau, Solarzelle, Wasserkraftwerk) ausgegangen. Damit gehen alle „Förderverluste“ zu Lasten des Ressourcenlagers oder -reservoirs (vgl. FRITSCHE 2018a, GROßKLOS 2014, IINAS 2018).

Bei der Definition des kumulierten Energieaufwandes (KEV) wird besondere Bedeutung auf die Energieaufwände in den einzelnen Lebenszyklusphasen eines Produktes sowie auch bei dessen Produktionsprozessen gelegt. Dazu werden einzelne Prozessketten nach ihrer Energieform und -menge untersucht und in Primärenergie-Äquivalente umgerechnet. Der kumulierte Energieaufwand (KEV) ist ein Indikator für die nutzbare Energie, die den gesamten Energieaufwänden gegenübergestellt wird. Er ermöglicht damit die energetische Vergleichbarkeit zwischen Produktionsweisen. Die detaillierte Berechnungsmethode sichert verlässliche Referenzwerte für die CO₂-Bilanzierung (GROßKLOS 2014). International werden drei KEV-Werte unterschieden:

- KEV_{Summe} sowie die Komponenten,
- KEV_{NE} nicht erneuerbare (fossile und nukleare) Primärenergie
- und in KEV_{RE} regenerative (erneuerbare) Primärenergie.

Der gesamte KEV ist nach Angaben (IINAS 2018) für ressourcenorientierte Fragen relevant, jedoch nicht richtungssicher. Der KEV_{ne} stimmt genauer mit den THG-Emissionswerten überein. In Bilanzierungen wird daher vorwiegend auf den KEV_{ne} abgestellt (Ilinas 2017). In Deutschland gelten nach den Studien des Öko-Instituts Berlin sowie dem Umweltbundesamt (UBA) die Werte nach GEMIS (4.93 und Folgeversionen). Seit 2017 ist das Computermodell **GEMIS** in der neuen Version 5.0 aktualisiert und veröffentlicht. Es gibt die Lebenswege der Stromerzeugung für die Jahre 2010–2016 an (IINAS 2018). Das Jahr 2017 wurde darin neu bilanziert und unveränderte Szenario-Werte für die Jahre 2020–2050 ausgewiesen (IINAS, 2018).

Basierend auf diesen Informationen werden diese Referenzwerte (CO₂-Äquivalente) von GEMIS 4.93 (2014) für die Berechnungen in der Methode dieser Arbeit verwendet und sind in der folgenden Abbildung 21 rot markiert.

Kumulierter Energieverbrauch verschiedener Energieträger und Energieversorgungen					
Ergebnisse berechnet mit GEMIS Version 4.93 (Sommer 2014)					
Energieart	Prozeß ¹⁾	Kumulierter Energieverbrauch [kWh _{Prim} /kWh _{End}]			Treibhausgase CO ₂ -Äquivalent [g/kWh _{End}]
		Gesamt	nicht regenerativer Anteil	regenerativer Anteil ³⁾	
Brennstoffe ²⁾	Heizöl EL	1,16	1,15	0,00	313
	Erdgas H	1,13	1,13	0,00	241
	Flüssiggas	1,10	1,10	0,00	261
	Steinkohle	1,06	1,06	0,00	427
	Braunkohle	1,21	1,20	0,01	449
	Holz hackschnitzel	1,05	0,03	1,01	14
	Brennholz	1,01	0,01	1,00	11
	Holz-Pellets	1,08	0,06	1,02	18
Fernwärme Mix	Deutschland (gemäß Gemis)	1,32	1,08	0,24	295
Nahwärme Mix	Beispielnetz mit 74 WE	0,98	0,98	0,00	216
Solarwärme am Gebäude	Flachkollektor	1,04	0,03	1,00	13
	Vakuumröhrenkollektor	1,05	0,05	1,00	18
Strom	Strom-mix	2,67	2,12	0,55	617
	PV-Strom (amorph)	1,29	0,27	1,03	83
	PV-Strom (monokristallin)	1,53	0,47	1,05	129
	PV-Strom (multikristallin)	1,25	0,23	1,02	62
	Wind (Park Mittelwert 2010)	1,03	0,03	1,00	10

¹⁾ Vorgelagerte Kette für Endenergie bis Übergabe im Gebäude, inkl. Materialaufwand für Wärme-/Stromerzeuger und ohne Hilfsenergie im Haus
²⁾ Bezugsgröße: unterer Heizwert H_u
³⁾ Der regenerative Anteil beinhaltet auch sekundäre Ressourcen, z. B. Restholz und Müll

IWU, 17.12.14

Abb. 21: Vergleich der Emissionswerte nach Energieträgern (Großkloß 2014; In IINAS 2014)

➔ In Bezug auf diesen Bericht weist Iinas nochmals darauf hin, dass die aktualisierten Daten gegenüber den früher publizierten Ergebnissen nur zu geringen Veränderungen der KEV- und THG-Werte führten. Diese lagen bei -0,1 % bis -0,7 % mit Ausnahme der Jahre 2014–2016 (-1,4 bis +1,5 %) und bestätigen damit eine fortlaufende Tendenz zur Senkung von KEV- und THG-Werten.

Für die Ermittlung eines Vermeidungsfaktors entstanden ebenfalls verschiedene Modelle, die sich aus den bereits vorgestellten CO₂-Äquivalenten (Verursachung) ableiten. Dabei wurden geltende Richtlinien der EU herangezogen, um beispielsweise eine gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung zu bewerten (IINAS 2018, IINAS 2020). Weiter spielt die Berechnung des Primärenergiebedarfs aus nicht-brennbaren Energieträgern wie nicht-brennbare erneuerbare Energiequellen und Kernenergie eine wesentliche Rolle. Hierfür gilt nach IINAS (2020) noch keine einheitliche und eindeutige Methode.

Mit einer „direkten Äquivalenzmethode“ wurde die Primärenergieversorgung berechnet, indem fossile Brennstoffe und Biomasse anhand ihres Heizwerts bilanziert wurden. Bei „nicht-brennbaren Energieträgern“ inklusive der Kernenergie und allen nicht-brennbaren erneuerbaren Energien wird damit erzeugte Sekundärenergie angerechnet. Laut IINAS (2020) führt diese Methode zu einer Unterbewertung des Beitrags von nicht-brennbaren erneuerbaren Energien und der Kernenergie gegenüber Bioenergie und fossilen Brennstoffen. Weiter heißt es, dass sich die Wahl der Bilanzierungsmethode stark auf die relativen Anteile unterschiedlicher, individueller Energiequellen auswirke.

3.3.7. Verwendung der CO₂-Äquivalente

Das vom Öko-Institut Berlin entwickelte *Globale Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS)* stellt die ermittelten CO₂-Äquivalente zur Feststellung von CO₂-Emissionen zur Verfügung. Nach der ersten Version im Jahr 1989 übernahm das Bundesministerium für Umwelt (BMUV), das Bundesministerium für Forschung (BMBF) sowie das Umweltbundesamt (UBA) die Förderung von GEMIS. Ebenso unterstützen die Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), die Europäische Umweltagentur (EUA) die permanente Aktualisierung von GEMIS, dass eine lückenlose Darstellung aller Emission verursachenden Produktionsprozesse anstrebt.

Die Evaluation aller Verursachungsfaktoren, der Vorketten, der Produktion und Dienstleistungen eines gesamten Produktlebenszyklus weisen starke Unterschiede zwischen den internationalen Forschungseinrichtungen auf. Im Auszug der CO₂-Referenzwerte zeigt je nach Energieform sehr unterschiedliche Werte auf. Besonders große Abweichungen sind zwischen den CO₂-Äquivalenten für die bezogenen Energieträger Erdgas, Heizöl und Fernwärme und den geltenden Werten für erneuerbare Erdwärme sichtbar. Selbstverständlich ist dies darauf zurückzuführen, dass fossile Brennstoffe die höchsten CO₂-Äquivalente besitzen, während die CO₂-Äquivalente für erneuerbare Geothermie sehr niedrig sind. Somit verdeutlichen die CO₂-Äquivalente der Wärmegewinnung durch Erdwärme den Vermeidungsfaktor durch die starke Abweichung der CO₂-Äquivalente für erneuerbare Energien von denen der fossilen Brennstoffe. In der folgenden Tabelle sind die verwendeten CO₂-Äquivalente für die Berechnungen in dieser Arbeit zusammengefasst (IINAS 2020).

Für Tiefengeothermie lag das CO₂-Äquivalent bei 0,265 kg/kWh CO₂ (Bundesverband Geothermie 2014) und bei 0,011 kg /kWh (IINAS:2014). Die Werte für oberflächennahe Geothermieanlagen für Wärmenutzung unterschieden sich jeweils nach dem Grad der Kraftwärmekopplung von 0 % (0,407 kg/kWh CO₂), 35 % (0,313 kg/kWh CO₂) und 75 % (0,219 kg/kWh CO₂). Zahlen des Umweltbundesamtes von 2019 zeigen den relativ hohen Bedarf an fremdbezogener Hilfsenergie (Strom), die für die Gewinnung der Erdwärme benötigt wird.

Zeitweise wiesen die Äquivalente negative Emissionsfaktoren auf:

- für oberflächennahe Geothermie (-0,184 g/kWh CO₂)
- und andere erneuerbare Energieträger (-0,022 g/kWh CO₂) (UBA 2019a).

bis 110 g CO₂-Äquivalenten pro Kilowattstunde liegen (UBA 2019b). Eine aktuelle Studie geht von Kosten in Mrd.-Höhe aus, wenn alle Produktionsketten sowie die Halbwertszeiten von Atommüll einberechnet werden. Somit steht Atomstrom für die teuerste statt die günstigste und „CO₂-emissionsfreiste“ Energieform (GREENPEACE 2012).

Es wird unterschieden in Energieträger, die bereits bei ihrem Abbau und bei der Energieerzeugung durch chemische Verbrennungsprozesse CO₂ freisetzen (Kohle, Erdgas, Erdöl) und den erneuerbaren Energien, für die bei der Herstellung CO₂ emittiert wird, die bei der Energieerzeugung aber kaum CO₂ freisetzen. Beim Einsatz von erneuerbaren Energien ist ebenfalls die Laufzeit einer Anlage zu berücksichtigen, die allerdings aufgrund nicht einschätzbarer Faktoren nie genau bestimmt werden kann (Technische Defekte, Beschädigungen, Witterungseinflüsse usw.) (QUASCHNING 2020).

Die CO₂-Äquivalente unterscheiden sich im selben Jahr ebenfalls sehr voneinander.

- ➔ **An CO₂ als Indikator für Klimaschutzmaßnahmen wird dabei für die Bewertungsgrundlage festgehalten. Sie dient damit als Indikator für den Emissionsfaktor mit Angaben zur Klimaverträglichkeit von Energie.**

- ➔ **Vergleichsweise sind die CO₂-Äquivalente des Landes BW aufgeführt und deren Abweichung von den in dieser Arbeit verwendeten Werten. Dabei wird deutlich, dass diese CO₂-Äquivalente in drei Fällen weit unter GEMIS 4.93 (2014) liegen.**

3.3.8. Reflexion zur CO₂-Bepreisung

Da Deutschland verpflichtet ist, seine Treibhausgase bis 2030 um 38 % gegenüber 2005 zu senken, kann eine Verfehlung der Ziele für den deutschen Steuerzahler teuer werden. Bei Verfehlen der Klimaschutzziele bis 2030 wäre für einen Ausgleich der Ankauf von Emissionshandelszertifikaten anderer Mitgliedsstaaten erforderlich. Aktuell wird dieser auf ca. 300 Mio. Euro geschätzt. Da aber ein starker Preisanstieg für CO₂-Zertifikate seit 2021 sichtbar ist, werden Zertifikatspreise von > 100 Euro pro Zertifikat erwartet. Das würde dann einen Zertifikatsankauf von 30 bis 60 Mrd. Euro im Zeitraum 2021–2030 erfordern (UBA 2019c:2).

Hier stellt sich die Frage, wie Klimaneutralität erreicht werden kann und welche Maßnahmen und Steuerungsinstrumente Wirkung zeigen könnten. Aufgrund dieser drohenden Kosten wurde von einer notwendigen Reform der Energiesteuersätze im deutschen Energiegesetz gesprochen, die eine Minderung durch finanzielle Zusatzbelastung für CO₂-Emissionen forciert. Danach könne die drohende „Minderungslücke“ – die sogenannte „nicht erreichte CO₂-Reduktion“ – nur mit einer zusätzlichen CO₂-Bepreisung vermieden werden. Der gewünschte Effekt: einen Anreiz für emissionsarme Technologie zu schaffen, blieb zunächst aus. Die Diskussion um einen Mindestpreis für eine Tonne CO₂, deren Benennung noch nicht einheitlich festgelegt war, verfolgt diesen Effekt (ZENKE & FUHR 2006; BÄRWALDT 2009; EU ETS 2018).

Da in Deutschland vor 2021 noch kein eingeführtes CO₂-Bepreisungssystem bestand, wurde von Experten dringend zu einer Steuer auf Treibhausgasemissionen geraten. Die Bezeichnung reicht von einer möglichen *CO₂-Abgabe* in Form einer *CO₂-Besteuerung* oder einer *CO₂-Bepreisung*, auch *CO₂-Strafgebühr* genannt. Man spricht auch von *CO₂-Strafabgaben* oder einer umgelegten *CO₂-Emissionsgebühr*. Eine *Verursachungsgebühr*

und eine *Umwelt- oder Klimaabgabe* werden ebenfalls genannt. Die Begrifflichkeiten variieren in der Fachliteratur sehr und sind noch nicht einheitlich festgelegt. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der Begriff **CO₂-Steuer**¹⁵ gewählt. Ebenso besitzt Deutschland bisher keine einheitliche Messmethode für CO₂-Emissionen, sodass fossile Energieträger auf der Basis der bei ihrer Verbrennung entstehenden Treibhausgase besteuert werden (ebd.).

Es wurde zu einem Messverfahren geraten, das sich nicht ausschließlich auf die Nutzung von Energie bezieht und damit Emissionskosten indirekt über die Verbrauchssteuer (Strom- und Energiesteuer) auf den Verbraucher umlegt. Dass dies keinen Anreiz für Energiekonzerne bietet, in emissionsarme Energieformen zu investieren, sei evident. In Deutschland werden Energieträger mit sogenannten Mengensteuern belegt, indem die jeweiligen Treibhausgasemissionen herangezogen werden. Dies wird als *umgekehrte CO₂-Steuer* bezeichnet (ZECH et al 2018).

Aus den genannten Gründen entstand die Diskussion über die grundsätzliche Effizienz von Emissionshandelssystemen sowie deren Erfolge. Auf EU-Ebene einigte man sich darauf, dass eine zusätzliche (nationale oder EU-weite) Bepreisung in Form eines Zertifikats, einer CO₂-Steuer notwendig wird, um durch die Lenkung von Investitionsströmen sowie CO₂-Minderungsanreizen eine maximale Erderwärmung von + 1,5 °C zu erreichen. Mit zunehmender administrativer Etablierung und Akzeptanz wurden Abgaben als wichtigste Kontrollinstrumente des Klimaschutzes gesehen und sind unbedingt international verbindlich zu gestalten (ALTVATER 2006; HUNEKE 2017; BACH/WITTENBERG 2019).

Ein marktwirtschaftliches Anreizsystem für erneuerbare Energien wurde in Deutschland bereits durch Einspeisevergütungen im Rahmen des Erneuerbare-Energie-Gesetzes (EEG) geschaffen. Danach wurde darüber diskutiert, wie sich die Energiepreise mit dem geplanten Ausstieg aus der Kernenergie im Jahr 2022 entwickeln würden. Man rechnete vor dem Krieg in der Ukraine mit einem Rückgriff auf emissionsreiche fossile Brennstoffe, um Versorgungslücken im Falle von Energieverknappung zu vermeiden. Mögliche Reinvestitionen in Kohlestrom sollten durch entsprechende Bepreisungen verteuert werden, um auf diese Weise den Ausbau erneuerbarer Energien zu fördern (BRD 2016a, BRD 2016b)¹⁶.

Durch die Verknappung fossiler Brennstoffe aufgrund der Gas-Krise, wird dieser Effekt ebenfalls erzielt. Es wurde davon ausgegangen, dass die CO₂-Emissionen laut Prognosen wieder ansteigen, sofern das Versorgungsnetz nicht zeitgleich für die Einspeisung erneuerbarer Energien spitzenlastfähig wird. Fossile Energieträger wie Kohle, Erdgas und Erdöl würden zur Überbrückung in der Stromproduktion eingesetzt werden müssen und die Energiepreise – wie im Jahr 2008 beobachtet – stark ansteigen lassen. Man ging davon aus, dass der rechtzeitige Ausbau erneuerbarer Energien sowie der Errichtung eines spitzenlastfähigen Netzes die Energiewende ermöglicht. So zeigt das Szenario (hier Abb.22: Huneke 2017) die prognostizierte Wirkung einer CO₂-Steuer auf die die CO₂-Senkung sowie den gleichzeitigen Einfluss unterschiedlicher CO₂-Steuersätze (HUNEKE 2017, WILLIAM 2017, IINAS 2020).

¹⁵ Weiter werden die Begrifflichkeiten *Umweltabgabe*, *Verursachungssteuer* und *Schadensgebühr* verwendet.

¹⁶ Die aktuelle Situation seit Beginn des Krieges in der Ukraine war zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch nicht absehbar. Es erfordert einen neuen ausführlichen Blick auf die aktuellen Entscheidungen bezüglich der Energieversorgung in Deutschland, das eine Unabhängigkeit von russischem Erdgas anstrebt. Dies kann hier nicht vollständig berücksichtigt werden.

Während die Einführung einer CO₂-Steuer in den Jahren 2005 bis 2012 sehr skeptisch angesehen wurde, sind in den letzten Jahren neue Modelle entstanden. Dabei wurde die Vereinbarkeit mit dem bestehenden Energiesteuergesetz angestrebt sowie auch ein Signal für eine stabile Energiepreiswirtschaft gegeben (HUNEKE 2017). Sowohl die Mitgliedsstaaten der Vereinten Nationen als auch die EU haben unterschiedliche Konzepte entwickelt, wie die jeweiligen Staaten eine zusätzliche Steuer in ihre nationalen Steuersysteme integrieren könnten. Einige Länder und Regionen haben bereits unterschiedliche CO₂-Steuersysteme eingeführt ¹⁷. Seit 2021 werden CO₂-Steuern von den Energielieferanten an den Endverbraucher weitergegeben und auf den Kilowattpreis aufgeschlagen.

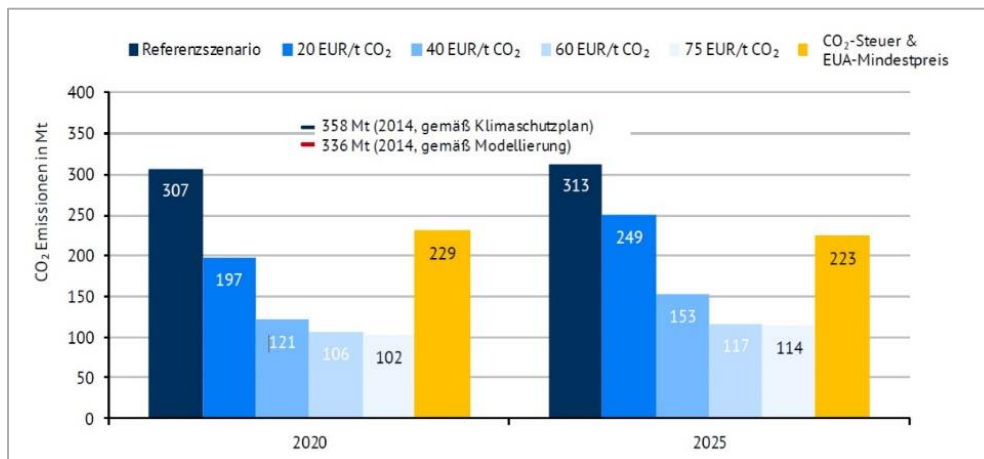


Abb. 22: Vergleich der CO₂-Emissionen des deutschen Kraftwerkparcs je modelliertem Szenario (Huneke 2017:23)

Die Entwicklung der CO₂-Besteuerung innerhalb Europas könnte in die Richtung gehen, dass jedes Land seine eigenen Energieexporte höher besteuert als seine Energieimporte, um CO₂-Emissionen zu vermeiden. Eine gegenseitige Exporthemmung würde einen zusätzlichen Effekt auf die Förderung regionaler Energiequellen mit sich bringen und fossile Energieträger zusätzlich verteuern. Stromimporte könnten ebenfalls durch eine nationale CO₂-Besteuerung und den Ausbau der erneuerbaren Energien verhindert werden (HUNEKE 2017:35).

➔ **Dies leitet zu der Annahme, dass jedes Land/Bundesland und jede Region in mittelfristiger Zukunft ihre CO₂-Emissionen separat auszuweisen hat und eine Vergleichbarkeit zwischen Regionen ausgebaut wird. Daraus wird die erforderliche Flächenneubewertung in dieser Arbeit abgeleitet.**

Der Zweck einer CO₂-Besteuerung wird kritisch diskutiert: zwar wird mit finanzieller Zusatzbelastung bei hohen CO₂-Emissionen ein Anreiz für Investitionen in emissionsarme bis emissionsfreie Energiesysteme geschaffen, die langfristig zu einer finanziellen Entlastung führen können. Aber die Innereuropäische Energiepreisentwicklung kann sich dennoch sehr instabil entwickeln. Hier wurde deutlich, wie die Einführung von Abgaben für CO₂-Emissionen den Markt regulieren. Das Auslaufen der auf 20 Jahre bewilligten Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbarer Energie ins öffentliche Netz könnte danach zu einem Rückgang der Einspeisemenge führen (vgl. HUNEKE 2017, KAHL 2017, JÄHRLICH 2016, BACH/WITTENBERG

¹⁷So kostet in Schweden eine Tonne CO₂ bereits seit 1991 zusätzlich 120 Euro, während in Irland noch 20 Euro pro t/CO₂ angesetzt sind. Seit 2001 kosten zusätzliche CO₂-Emissionen in Großbritannien 18 GB-Pfund.

2019). So zeigen in Auftrag gegebene Studien des Umweltbundesamtes und des Öko-Instituts Berlin, dass CO₂-Abgaben in Ergänzung zu Mindestpreisen im Emissionshandel oder in Kombination mit EUA-Preisen (Europäischer Zertifikatshandel) zu CO₂-Einsparungen von ca. 60 – 100 Megatonnen (Mt: Mio. t) in 5 Jahren führen können. Die Einführung zusätzlicher CO₂-Steuern erschien dadurch sehr wahrscheinlich. Dabei wurde eine Kombinierbarkeit einer nationalen CO₂-Steuer mit europäischen Klimaschutzinstrumenten angestrebt (LAUF 2019, HUNEKE 2017; REPENNING et al. 2019). Dies ist in der aktuellen Gas-Krise ebenfalls zu beobachten.

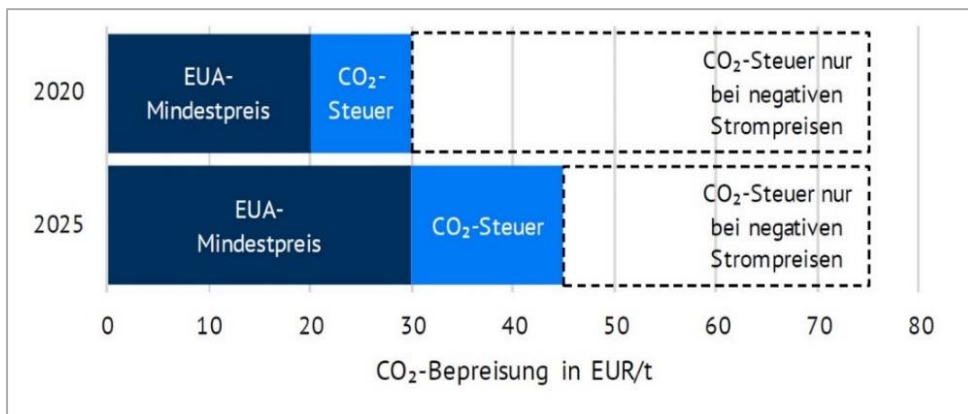


Abb. 23: CO₂-Steuer als Ergänzung zu einem EUA -Mindestpreis (Huneke 2017: 21)

Anhand dieser Studie wurde festgestellt, dass eine Steuer von 40 Euro/t CO₂ für die Erreichung der Pariser Klimaschutzziele über das 2025 hinaus ausreichen würde (Abb. 23+24+25). Der CO₂-Preis hat mittel- bis langfristige Auswirkungen auf Investitionen in emissionsstarke Technologien und fördert die Stilllegung emissionsintensiver Kraftwerke, da in Abhängigkeit der Grenzkosten die Brennstoffpreise für Braunkohle steigen sollen (vgl. GROßKLOß 2014, HUNEKE 2017, KAHL 2017, JÄHRLICH 2016).

Auch die Strompreise erhöhen sich nach diesem Szenario bis ins Jahr 2025 auf 58 €/MWh (s. Abb.23). Danach sind die Klimaschutzziele mit einer nationalen Steuer von 40 Euro/t CO₂ bis 2030 erreichbar. Die Angaben von 2017 belegen, dass ohne eine CO₂-Steuer diese Ziele nicht erreicht werden konnten und von der Bundesregierung bestätigt wurde (BGV 2021). Diese Entwicklungen hängen von der Anpassungsfähigkeit und der Investitionsbereitschaft in Spitzenlasttechnologien der Energiewirtschaft ab:

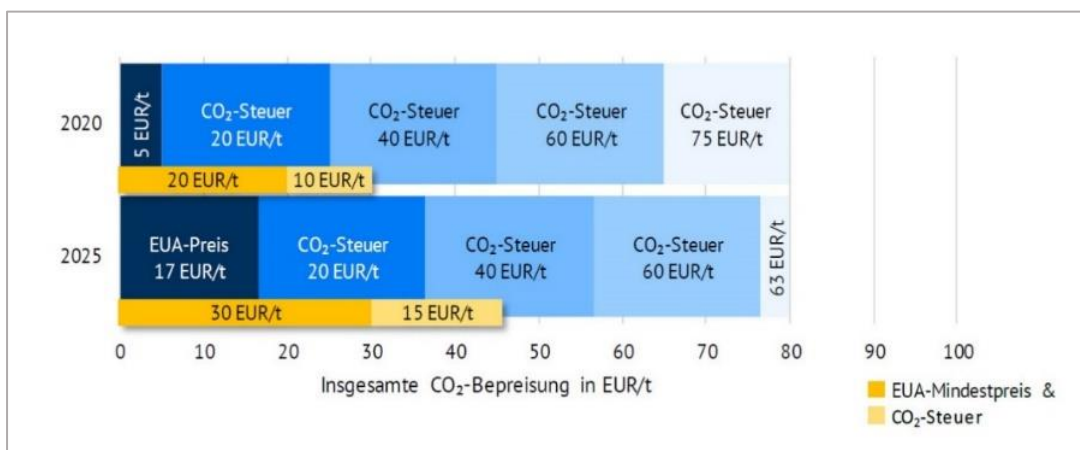


Abb. 24: Übersicht der CO₂-Bepreisung in Szenarien mit einer nationalen CO₂-Steuer (Huneke 2017: 23)



Abb. 25: Einführung einer CO₂-Steuer auf CO₂-Emissionen (Huneke, 2017: 24)

In weiteren Studien wurden höhere CO₂-Sätze angesetzt, sodass bei Strom mit Sätzen von 25–180 Euro/ t CO₂ kalkuliert wird. Bei Wärme werden Sätze von 25-200 Euro/ t CO₂ angesetzt (ZECH et al. 2018). Bei Hennes et al. (2021) werden 260 Euro/ t CO₂ als erforderlich prognostiziert. Darüber hinaus geben Zech/Lindner (2018) an, dass die treibhausgasspezifische Steuerbelastung verschiedener Energieformen sehr unterschiedlich ausfallen wird (s. Abb.26).

- ➔ **Während bei Strom (aus Braunkohle bis Wasserkraft) eine enorme Bandbreite von 20 - 7.355 Euro je Tonne CO₂ besteht, sind es im Verkehr (aus Erdgas bis Bioethanol) nur 50 – 618 Euro pro Tonne CO₂.**
- ➔ **Im Wärmesektor (von Holzpellets bis Wärmepumpe) werden 0 – 36 Euro Steuerlast festgestellt.**

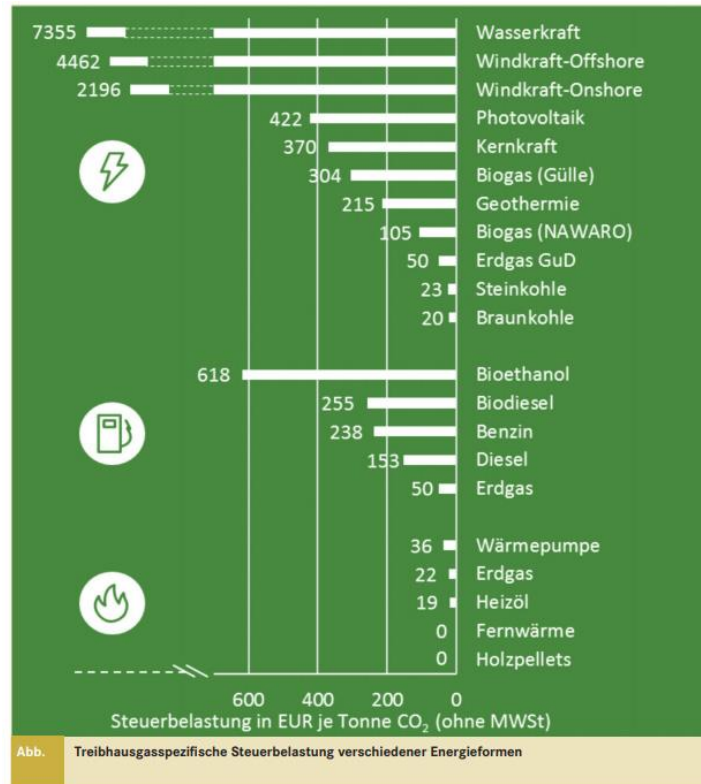
So verdeutlichen diese Angaben, dass besonders die erneuerbaren Energien von einer CO₂-basierten Besteuerung profitieren würden, da gleiche Bedingungen für alle Energieformen geschaffen würden und der Klimaeffekt in den Vordergrund rücken würde (ZECH et al. 2018).

Nach Angaben des UBA (UBA 2019c) lässt sich im Sektor Verkehr eine Lücke von ca. 61 Mio. t CO₂-Äquivalent und im Bereich Gebäude eine Minderungslücke von ca. 12 Mio. t CO₂ für 2030 ableiten. Deshalb wird in der CO₂-Bepreisung die wichtigste Voraussetzung - neben der drastischen Verbrauchsreduzierung - für die Erreichung des Klimaschutzplanes gesehen.

Das UBA (UBA 2019c) errechnete für Deutschland bis 2030 einen Steuersatz von 205 Euro/t CO₂ aus. Diese Werte werden an den Klimaschadenskosten sowie auch an den CO₂-Vermeidungskosten von Klimazielen orientiert. Die Lenkungswirkung der CO₂-Preise hängt laut von der Kostenentwicklung bei Klimaschutztechniken, Innovationen, komplementären klimapolitischen Instrumenten und sozioökonomischen Trends ab (UBA 2019c).

Weiter wird für das 1,5 Grad Ziel von 135 US \$/t CO₂ von mehreren Tausend Euro ausgegangen, um die gewünschte Lenkungswirkung zu erzielen. Im Gebäudesektor sei eine regelmäßige Anpassung an die Inflation notwendig. Dies sei gerade vor dem Hintergrund, dass auch die nationalen Energiesteuersätze real ca. 20 % ihres Wertes verloren haben, miteinzukalkulieren. Zudem würde eine CO₂-Steuer, die weiterhin am Energiemengenverbrauch orientiert wäre, sozial unverträglich werden, da sie weiterhin die Kosten für den Endverbraucher erhöhen und nicht die Energieunternehmen belasten würde (UBA 2019c; IINAS 2020). Dies ist aktuell in der Gas-Krise zu beobachten.

Abb. 26: Treibhausgasspezifische Steuerbelastung verschiedener Energieformen (Zech et al. 2018)



Seit 1. Januar 2021 gilt die CO₂-Steuer für Erdgas und Heizöl, die direkt über die Strompreise auf den Verbraucher umgelegt wird. Danach gelten folgende CO₂-Steuersätze, die bis 2025 stetig ansteigen:

Tab. 8: CO₂-Steuer seit 1.1.2021 (Brennstoffemissionsgesetz (BEHG): BRD 2019)

Jahr	Preis je Tonne CO ₂	Heizöl	Erdgas
2021	25 Euro /t	7,9 ct/l	0,6 ct/kWh
2022	30 Euro /t	9,5 ct/l	0,7 ct/kWh
2023	35 Euro /t	11,1 ct/l	0,8 ct/kWh
2024	45 Euro /t	14,2 ct/l	1,1 ct/kWh
2025	55 Euro /t	17,4 ct/l	1,3 ct/kWh

Diese CO₂-Steuer wird direkt auf die Verbraucher umgelegt und von den Energieanbietern über den Strompreis eingezogen. Der Preis pro Liter Heizöl lag im Mai 2021 bei 63,82 Cent und für Erdgas und (Statista 2021). Dabei wurden die CO₂-Steuern einzeln ausgewiesen und sind in den Abrechnungen sichtbar. Um die Dimensionen der CO₂-Steuer zu verdeutlichen und deren monetäre Gesamtsumme auszuweisen, sind in dieser Arbeit die CO₂-Steuern direkt aus den CO₂-Emissionen abgeleitet und separat dargestellt (Kap.7.8.). Das hat zum Vorteil, dass finanzielle Aufwendungen für die CO₂-Steuer im Einzelnen betrachtet und bei zukünftigen Investitionen berücksichtigt werden können.

Die Abbildungen 24 - 27 zeigen Szenarien auf, die diese Annahmen bestärken und auf die sich die Ableitung der Forschungsfrage in dieser Arbeit mitbegründet:

- Mit der Einführung einer CO₂-Steuer zusätzlich zu einem EUA-Mindestpreis fallen zusätzliche Kosten an, die sich direkt auf die Betriebskosten einer Institution auswirken und dem Verursacher direkt zugeteilt werden.
- Damit ist eine Umlegung auf den Endverbraucher bzw. Bürger oder Mitarbeiter nicht mehr direkt möglich. Die Institutionen werden dadurch zu direkt messbaren CO₂-Einsparungen veranlasst, die in ihren Bilanzen nachweisbar sein müssen.

Weiter fordern Klimaschützer und die Grünen die zusätzliche Einführung eines *CO₂-Schattenpreises*, dessen Wirkung ebenfalls auf Investitionen der öffentlichen Hand lenken soll. Ein *Schattenpreis* definiert den wahren Preis eines Gutes inklusive der sozialen Kosten und Nutzen. Dazu soll der Staat alle Bestimmung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses von „jeglichen Plänen, Gesetzen, öffentlichen Investitionen und Beschaffungen“ in den CO₂-Schattenpreis miteinrechnen. Nach ersten Berechnungen liegt der CO₂-Schattenpreis bei 195 Euro pro Tonne CO₂ (WETZEL 2021).

- ➔ **Dazu kann eine neue Flächenbewertung hilfreich sein, weil sie die Flächen nach dem CO₂-Reduktionspotenzial ausweist und unabhängig von ungenauen Verbrauchswerten Auskunft über CO₂-Einsparung gibt.**
- ➔ **In dieser Arbeit werden die vorgestellten CO₂-Äquivalente (GEMIS 2014) für die Berechnung der Emissionen sowie der Einsparungen von CO₂ verwendet, um beispielhaft darzustellen, was an Einsparpotenzial auf der Fläche vorhanden wäre.**
- ➔ **Weiter wird die Antwort auf die Frage hergeleitet, wie viel CO₂ eine Fläche wert sein kann. Dazu wird zunächst die fachliche Diskussion um den CO₂-Emissionshandel vorgestellt, um im Anschluss auf die CO₂-Bepreisung einzugehen, aus der sich dann der angestrebte CO₂-Flächenwert ermitteln lässt.**

3.4. Energie- und Gebäudemanagement

Dem Gebäude- und Energiemanagement im staatlichen Hochbau wird ein wichtiges Handlungsfeld innerhalb des Klimaschutzes in Baden-Württemberg zugewiesen. Die in den Landesbauten untergebrachten öffentlichen Einrichtungen weisen unterschiedliche Strukturen in ihrer Gebäudeverwaltung auf. Das Energiemanagement der jeweiligen Verwaltung hat in enger Abstimmung mit dem zuständigen Amt für Vermögen und Bau zusammenzuarbeiten. Als Vertreter des Landesbetriebs koordinieren sie den wirtschaftlichen Rahmen, in dem Investitionen für bauliche und energetische Modernisierung und Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Die festgelegte Sanierungsrate bestimmt die Höhe der jährlichen Budgets.

Nach den Landesvorgaben sind Energiedaten zu dokumentieren und fachgerecht auszuwerten, um den verwalteten Gebäudebestand auf bauliche Dringlichkeiten, Energieeinsparpotenziale, CO₂-Einsparpotenziale und den benötigten Investitionsbedarf zu untersuchen. Das erforderliche Fachwissen für die Ableitung von Maßnahmen für Modernisierung und Sanierung ist in regelmäßigen Monitoring-Berichten aufzuführen und mit Priorisierung, Zielerreichung und Kostenaufwand zu dokumentieren. Die Koordination der übertragenen Gebäudeverwaltung führen Verwaltungsangestellte als Zusatzaufgabe aus, die den Energieverbrauch

überwiegend manuell erfassen. Nur wenige Institutionen verfügen bereits über automatisierte Zählerstrukturen.

Aus diesem Grund sind weder die Verbrauchswerte noch die Effekte von Klimaschutzmaßnahmen genau bestimmbar und erschweren das Monitoring zur Erreichung der Klimaschutzziele. Bis heute besitzt das Bundeswirtschaftsministerium keine ausreichend genauen Verbrauchs- und damit auch keine genauen Emissionsdaten des Gebäudebestandes: „Weder Wärmebedarf, noch Primärenergiebedarf und schon gar nicht CO₂-Emissionen sind flächendeckend für alle Gebäude in Deutschland (Wohnen, Produktion, Dienstleistung) bekannt.“ (OEHLER, 2018:10 nach BMWi 2014b:11). Weiter schlussfolgert OEHLER (2018), dass von *Unbekannt* nur schwer eine 80-95-prozentige Reduktion zu ermitteln sei.

- ➔ **Die Optimierung hin zu einem energieeffizienten Gebäudebetrieb stellt eine große Herausforderung dar, da Erfolgsmessungen von Energieeinsparmaßnahmen eine verlässliche Messmethode des Energieverbrauchs voraussetzen.**
- ➔ **Deshalb ist es so wichtig, unabhängig vom bisherigen Verbrauch und den CO₂-Emissionen eine Umstellung auf CO₂-arme Energien zu vollziehen, damit grundsätzlich CO₂ reduziert wird. Die Verbrauchsreduzierung ist additiv dazu zu bewerten.**

3.4.1. Energetische Sanierung und Denkmalschutz

Die energetische Sanierung von Gebäuden umfasst alle Maßnahmen an Gebäudehülle und Anlagentechnik, die ein Gebäude energieeffizient und im besten Falle emissionsfrei gestalten. Grundvoraussetzung hierfür sind die systematische energetische Bewertung und Investition in gezielte Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen, die sich nach den vorgestellten Vorschriften richten. Dabei spielt der Ausbau von erneuerbaren Energien eine besondere Rolle, da mit der Nutzung von erneuerbaren Energien, vereinzelt Fragen zur Sanierung in den Hintergrund rücken. Den Weg zu emissionsfreien Gebäuden hat OEHLER (2018) beschrieben und betont dabei wie Bestandsgebäude ganzheitlich saniert werden können. Dies spielt insbesondere bei Gebäuden eine große Rolle, die ganz oder teilweise unter die Regelungen des Denkmalschutzes fallen. Dabei wird häufig über die Frage diskutiert, wie dringend erforderlich es ist, dass das wenige architektonische Kulturgut, das nach den Kriegen in Deutschland unversehrt blieb, mit modernster Energietechnik auszustatten ist. „Hat diese Bausubstanz nicht bereits durch ihre Haltbarkeit und Widerstandskraft die erforderliche Nachhaltigkeit bewiesen und sollte genauso erhalten bleiben?“, auf diese Fragen gibt OEHLER 2018 bereits Antworten und kommt zu dem Ergebnis, dass Denkmal geschützte Gebäude nicht für die Einhaltung der Klimaschutzziele verantwortlich sind. In Deutschland verursachen 20 Mio. Bestandsgebäude einen Primärenergieverbrauch von 40 %. Dieser verteilt sich auf 18 Mio. Wohngebäude und ca. 1,5 Mio. Nichtwohngebäude (NiWo) und Industriegebäude. Davon seien 2 % als Baudenkmal geschützt und nehmen nur einen geringen Teil der Emissionsverursacher ein. Vielmehr erfüllen diese Gebäude eine weit wichtigere Aufgabe: sie sind Kulturgut, Stadtbild und Zeitzeugnis (frei nach OEHLER, 2018), statt Fortschritts- und Innovationsplattform.

- ➔ **Genehmigungen gegen die Stadtbildverordnung und den Denkmalschutz sind grundsätzlich möglich und nicht einschätzbar, weshalb die Standorte in dieser Arbeit nicht danach bewertet werden können.**

3.4.2. Verordnungen für energiesparende Neubauten

Neben den sanierungsbezogenen Vorgaben und den baulichen Modernisierungen, stehen Energie- und Umweltmanagementsysteme in erster Linie für die Effizienzsteigerung jedes technischen wie verwaltungstechnischen Systems. Damit wird deutlich, wie umfassend energetische Verbesserungen vorgenommen wurden und welche Bedeutung sie im Gebäudesektor für die CO₂-Einsparung einnehmen.

Ursprünglich entwickelten sich Managementsysteme in den 70er Jahren aus dem Qualitätsmanagement (QM). Bereits in den 80er Jahren wurden die international geltenden ISO 9000er Normen festgelegt. Seit den 90er Jahren wurden Richtlinien und Standards für Arbeitssicherheit eingeführt, die seither fast jährlich erweitert und definiert wurden. Die Überführung von europäischen Verordnungen in nationales Recht erfolgte mit der Energieeinsparverordnung von 2007 (ENEV 2007). Darin wurde wie in der europäischen Vorlage eine Mehrzonenbewertung übernommen, diese beinhaltete eine *Zonale Gebäudebewertung* durch Unterteilung der Gesamtgebäudehüllfläche in unterschiedliche Zonen und Techniken (Gebäudehülle, baulicher Wärmeschutz, Energieversorgung, Beleuchtung, Kühlung, Steuerung) (LICHTMEß (2010)). Der Standard des Jahres-Primärenergiebedarfs eines Neubaus reduzierte sich seit 1977 bis 2021 stufenweise in den gesetzlichen Vorgaben der WSchV 1977, WSchV 1984, WSchV 1995, EnEV 2002/ EnEV 2007, EnEV 2009 und EnEV 2013ff bis GEG 2021. Mit dem vorgeschriebenen Energieausweis sind Gebäude seither durch die Angaben zum Primärenergiebedarf und dem Endenergiebedarf (in kWh/ (m² a) energetisch bewertbar (WEGLAGE 2007):

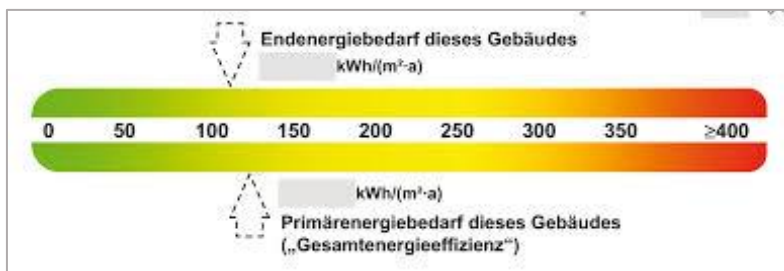


Abb. 27: Beispiel eines Energieausweises (Architektenkammer Baden-Württemberg 2021)

Mit neuen Verordnungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) wurden neue Energiestandards für Gebäudetypen -und -klassen entwickelt (BMU 2017, BMJV 2017):

- Niedrigenergiegebäude, Nullenergiehaus, Energieeffizienzhaus Plus (für öffentliche Gebäude, GEG 2020)
- Aktiv- und Passivhaus Standard, KfW 40 – KfW 60 (seit EnEV 2004),
- KfW-Effizienzhaus 55-70 (seit EnEV 2007)
- KfW-Effizienzhaus 40-55-70-85-100-115, KfW 40 PLUS (seit EnEV 2009)
- **Niedrig**-Energiegebäude, Gesamtenergieeffizienz (seit EnEV 2010-2016)
- **Niedrigst**-Energiegebäude nach nZEB-Standard/EU-Richtlinie EnEV (seit EnEV 2018)
- Nearly-Zero-Energy-Building (nZEB) EU-Richtlinie (für öffentliche Gebäude)

Dabei ist der zulässige Primärenergiebedarf jeweils stufenweise reduziert und die baulichen Anforderungen umfassender vorgeschrieben worden. Dies wird an der folgenden Graphik angezeigt:

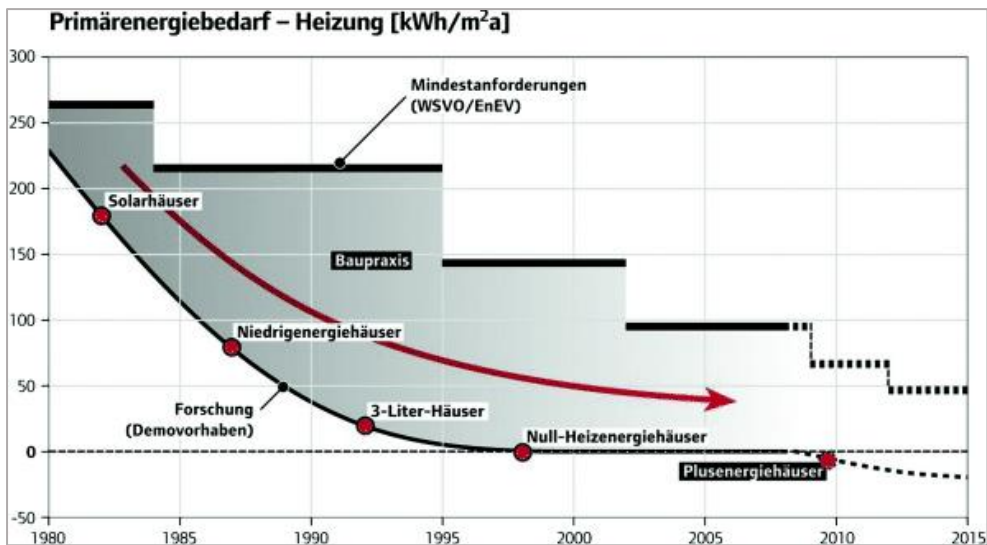


Abb. 28: Primärenergiebedarf - Heizung [kWh/m²a] (Oehler 2018:78)

- ➔ Mit der Energieeinsparung bei Gebäudesanierungen wird auf eine verbesserte Wohnqualität gesetzt, das zum Anstieg des Strom- oder Wärmeverbrauchs führt. Somit steht der Energieeffizienz immer auch ein Energiebedarfsanstieg gegenüber durch die zunehmende Elektrifizierung und Digitalisierung. Dies erschwert die CO₂-Einsparung weiterhin.
- ➔ Mit steigender Wohnfläche pro Kopf und einem zu reduzierenden Raumwärmebedarf pro m², steigt folglich die Anforderung an das Wärmespeichervermögen des Gebäudes.

Die Abb. 29 zeigt, wie sich der Raumwärmebedarf mit zunehmender Wohnfläche zwischen 1960-2030 verhält:

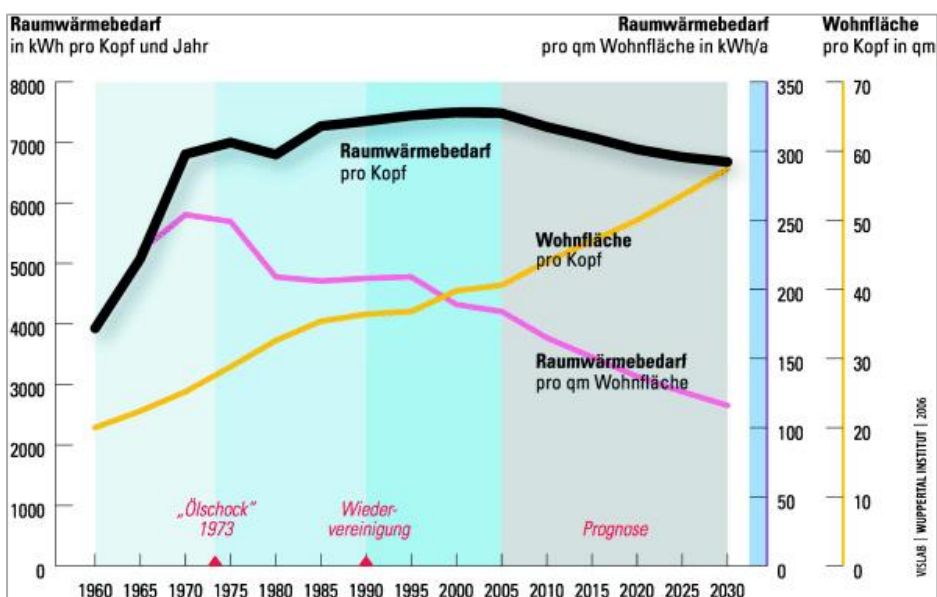


Abb. 29: Raumwärmebedarf pro Person (Oehler 2018, nach Venjakob & Hanke)

Um Gebäude nach europäischer Norm zu bewerten, hat die Bundesregierung die rechtlichen Rahmenbedingungen für das Energie- und Gebäudemanagement in den einen CEN-Normwert und die DIN-Normen (DIN 4701 und DIN 18599) überführt. Neben den bereits vorgestellten Energieeinsparverordnungen (EnEV 2007 bis GEG 2021) gelten weitere europäische Normen für Energiemanagementsysteme unterschiedlicher Gebäudetypen:

- Mit DIN EN 16001 entstand eine europäische Norm für Energiemanagementsysteme, die überwiegend kleine und mittlere Unternehmen (KMU) unterschiedlicher Branchen betrifft. Darin wird im Wesentlichen formell die Anforderung an ein Energiemanagementsystem und ein strukturiertes Umweltmanagementsystem beschrieben.
- **Die Norm ISO 14001** - auch unter dem Namen **EMAS (Eco Management and Audit Scheme)** bekannt - zertifiziert Unternehmen über den Leitfaden der DIN EN 16001 hinaus. Die erstellte *EMAS-Zertifizierung (nach ISO 14001)* basiert auf dem Nachweis für ressourceneffizientes Management.

Die Unterschiede zwischen den Normen **DIN EN 16001** und den **Normen EMAS, EMAS plus** und **ISO 14001** bestehen im Wesentlichen in der zu zertifizierenden Unternehmensstruktur. So entstanden mit der **ISO 14000ff** Umweltmanagementsysteme und Umweltverträglichkeitsprüfungen zur Optimierung der Umweltleistung eines Unternehmens. Für Unternehmen mit bereits unterschiedlichen Zertifizierungsstandards sind leicht weitere Zertifizierungen vorzunehmen, die Vergünstigungen in Form von Energiesteuerbefreiungen erteilen. Allerdings sind mit EEG 2016 einzelne steuerliche Vorteile wieder eingeschränkt oder abgeschafft worden.

Für Bildungseinrichtungen wie Hochschulen und Universitäten stellt die Zertifizierung nach EMAS optimierte **interne Prozesse und Strukturen** dar, die eine funktionierende Kommunikation innerhalb der Verwaltung bestätigen und Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen umsetzbar machen. Jährlich werden Betriebsbereiche analysiert, die sich teilweise mit den Anforderungen der Umweltzertifizierung überschneiden. Während die Umweltzertifizierung ein in vielen Bereichen noch offenes Verfahren darstellt, hat das zertifizierte Energiemanagement bereits eine DIN-Norm erreicht, die für ein effizientes, kosten- und ressourcensparendes *Qualitätssiegel* im Bereich des Energiemanagements steht. Die wesentlichen Ziele der Energiemanagement-Zertifizierung nach **DIN ISO 50001** sind: Kosten reduzieren, Umwelt schützen, Nachhaltig wirtschaften, Außendarstellung verbessern und gesetzliche Erleichterungen nutzen (BMUV 2016).

Mithilfe des PDCA-Kreislaufs (*Plan-Do-Check-Act nach Demingkreis ISO 50001*) wird eine kontinuierliche Verbesserung angestrebt (s. Abb. 30). Darin werden Energiesparziele aufgestellt, Daten erhoben und ausgewertet. In der Umsetzungsphase sind Prozesse zu optimieren, die im Anschluss in der Check-Phase überprüft werden. Eine strategische Optimierung wird an den Ergebnissen ausgerichtet, die sich dann wieder durch *Planen, Umsetzen, Kontrollieren und Handeln* verbessert. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine schrittweise Heranführung an Optimierungsprozesse, die meist nicht in einem Schritt angepasst werden können.

Universitäten, Hochschulen und Universitätskliniken berichten von ihren Maßnahmen und dem dafür verwendeten Finanzierungsrahmen. Dabei bestehen immer noch systembedingte Ungenauigkeiten. Allgemein sind Ungenauigkeiten in der Energieverbrauchskalkulation innerhalb der DIN-Normen für Neubauten zu erwähnen, über die sich Planer und Bauherren kritisch auseinandersetzen. Hierbei handelt es sich um nach EnEV-Norm berechnete und gemessene Verbrauchswerte, die anhand von Raumfläche,

Volumen, regionalem Klima kalkuliert und prognostiziert werden. Zur sogenannten *Grauen Energie* zählen z.B. die Stromverbräuche von Aufzügen. Entsprechende Berechnungstools für Energiebedarfe sind aus diesem Grund kritisch zu betrachten und spiegeln nicht unbedingt wahre Verbrauchswerte wider. Zudem konfrontierten die kontinuierlichen Verschärfungen der EnEV die Bauherren mit neuen Mindestanforderungen bei Neubauten, die nicht vorab einschätzbar waren (siehe GÜNTHER 2018, TUSCHINSKI 2016, TUSCHINSKI 2020, TUSCHINSKI 2021).

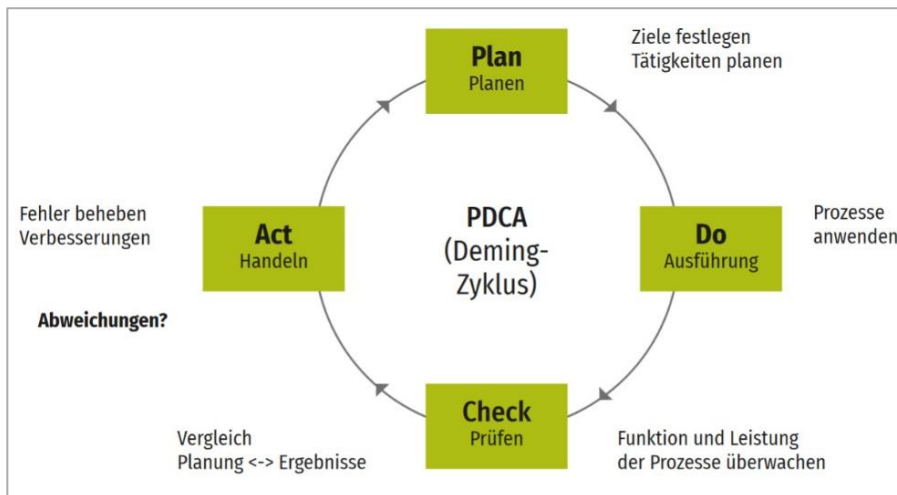


Abb. 30: PDCA-Zyklus
HOCH^N (HOCH^N 2018: 20)

Mit dem neuen Gebäudeenergiegesetz (GEG 2021) wurde eine Vereinheitlichung und eine Anpassung der relevanten Baukriterien in einem Gesetz zusammengefasst. Dies verspricht in den nächsten Jahren eine größere Planungssicherheit in Bezug auf die klimaschützenden Mindestanforderungen für Bauprojekte. Basierend auf diesen Diskussionspunkten demonstriert OEHLER (2018) kritisch, dass Deutschland kein Energieproblem besitzt, sondern ein CO₂-Problem, wie die Abbildung 31 darstellt. Danach sind die baulichen Vorgaben an den CO₂-Emissionen zu orientieren und weniger am Primärenergieverbrauch. Dies hätte den Vorteil, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien als *ausgleichende Maßnahme* an Bedeutung gewinnt.

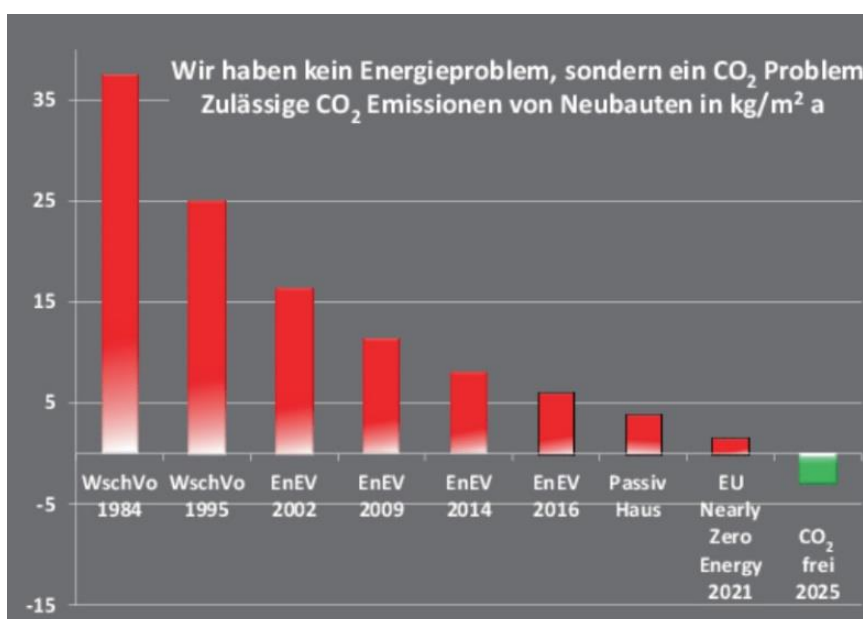


Abb. 31: Wir haben kein Energieproblem, sondern ein CO₂-Problem (OEHLER 2018:38)

Diese Arbeit möchte für zukünftige Zertifizierungsverfahren neue Kennzahlen ausweisen.

- ➔ Es wird festgestellt, dass die verwendeten Verbrauchswerte (des tba 2015) zu einem Teil geschätzte Werte sind, zu einem anderen großen Teil sind es manuell erfasste Werte, die nach diesen Ausführungen fehlende Verbrauchsposten aufweisen können. Die erfassten Verbräuche sind witterungsbereinigt.
- ➔ Diese Verbrauchswerte werden unter Berücksichtigung der systemisch begründbaren Fehlerquote für eine Gegenüberstellung genutzt. Die mögliche Ungenauigkeit in den Ergebnissen wird hiermit nochmals benannt.
- ➔ Die Flächenbewertung nach CO₂-Reduktionspotenzial ist unabhängig von den Verbrauchswerten ermittelbar und ergeht aus der Bestimmung des Energiepotenzials.

3.4.3. CO₂-neutral - CO₂-frei, klimaneutral oder Climate positive- Was nun?

Hier stellt sich die Frage: „Was bedeutet in diesem Kontext die Definition von CO₂-Neutralität, Klimaneutralität, CO₂-Freiheit und auch die Bezeichnung Netto-Null - Treibhausgasneutral?“ Übertragen auf das Untersuchungsgebiet ergaben sich in diesem Zusammenhang zu klärende Fragestellungen, die als Forschungsdefizit aufgenommen werden und in dieser Arbeit durch die Herleitung eigens erstellter Berechnungs- und Bewertungsmethoden beantwortet werden können. Nach verschiedenen Definitionen wird allgemein festgehalten, dass CO₂-Neutralität nicht mit Klimaneutralität gleichzusetzen ist, sondern nur eine Voraussetzung dafür darstellt.

Die Verwendung des Begriffs CO₂-neutral gibt Auskunft darüber, dass ein Brennstoff oder eine Aktivität CO₂ verursacht und damit keinen Einfluss auf die Kohlendioxid-Konzentration (CO₂) der Atmosphäre hat und insofern nicht klimaschädlich ist (Energie-Lexikon 2021). So gelten Rußemissionen nicht als klimaschädlich, wenn sie aufgefangen werden. Ebenso besitzt unverbranntes Methan noch keine CO₂-bedingte klimaschädliche Wirkung, dagegen wird freigesetztem Methan eine erheblich klimaschädigende Wirkung zugeschrieben.

Der Begriff der CO₂-Neutralität drückt aus, wieviel CO₂ emittiert wird. CO₂-Neutralität bezieht andere Treibhausgaswirkungen nicht mit ein und kann deshalb trotzdem klimaschädigende Wirkung verursachen. Dagegen drückt *Klimaneutralität* aus, dass durch Maßnahmen oder Prozess keine Beeinflussung des Klimas geschieht. Dies kann erreicht werden, indem eine Aktivität gar keine Treibhausgase in die Atmosphäre abgibt *oder* die Emissionen vollständig kompensiert werden.

Wenn es zu keinem Konzentrationsanstieg der Gase kommt, dann spricht man auch von *Netto-Null-Emissionen*. Netto-Null bedeutet auch, dass alle vom Menschen verursachten Treibhausgas-Emissionen wieder aus der Atmosphäre entfernt werden müssen und die Klimabilanz der Erde wieder netto Null beträgt. Damit würde die Menschheit durch Reduktionsmaßnahmen und die Abzüge durch natürliche und künstliche Senken ihren Einfluss auf die globale Temperatur wieder stabilisieren (nach myclimate 2021).

Dagegen stehen Maßnahmen und Prozesse, die sich positiv auf die Bilanz auswirken, indem sie netto einen *kühlenden Effekt* aufweisen. Als *Climate-positive (Klima-positiv)* werden diese Maßnahmen bewertet, die zur dauerhaften Senkung von Kohlenstoff in der Atmosphäre beitragen und mehr als kompensierend wirken. Außerdem bedeutet *klimaneutral nicht umweltneutral*, da auch andere Umweltbelastungen auftreten

können, z. B. durch Pestizide oder durch bei der Verbrennung entstehende Schadstoffe wie Stickoxide oder Ruß. Es hat sich gezeigt, dass etliche Biokraftstoffe vor allem durch ihre Herstellung insgesamt sogar zu höheren Umweltbelastungen führen als die Verwendung von Erdölprodukten. Die Umstellung der Wirtschaftsweise mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität oder CO₂-Neutralität heißt *Dekarbonisierung*.

Ausnahmen bestehen bei der Bezeichnung von geplanten Anlagen, die eine zwar *CO₂-reduzierte* aber noch nicht *CO₂-freie* Energiegewinnung vorweisen können. Häufig werden das Abscheiden und Speichern einer solchen Anlage dennoch als CO₂-neutral bezeichnet. Damit bedeutet CO₂-neutral nicht unbedingt, dass kein CO₂ emittiert wird (ebd.).

➔ **Ableitend aus dieser Definition werden in dieser Arbeit die CO₂-Emissionen von Ökostrom und Fernwärme mit den GEMIS-CO₂-Äquivalenten berechnet, um die dennoch bestehenden CO₂-Emissionen ausweisen zu können.**

Die verfälschende Verwendung der Bezeichnung „CO₂-neutraler Brennstoff“ bei dennoch kohlenstoffhaltigen Brennstoffen ist deshalb möglich, da die CO₂-Emission des kohlenstoffhaltigen Brennstoffes durch Kompensation auf Netto-Null-CO₂ runtergerechnet wird. Rechnerisch wird der Atmosphäre somit unter dem Strich kein CO₂ zugeführt, da es anderswo absorbiert oder weniger emittiert wird (nach ebd.).

➔ **Übertragen auf das Untersuchungsgebiet werden die CO₂-Emissionen, die durch den Bezug von Ökostrom und Fernwärme entstehen, kompensiert. Dies kann durch verschiedene Aktionen rechnerisch ausgeglichen werden.**

Holz gilt als ein CO₂-neutraler Brennstoff, solange der Wald mehr CO₂ aus der Luft aufnimmt, als bei der Verrottung von Pflanzen freigegeben wird. Der Wald - beziehungsweise Holz als Brennstoff - wirkt solange als Kompensator von CO₂ bis mehr Holz entnommen wird, als der Wald netto an CO₂ aufnehmen kann. Dies ergibt für nicht fossile Brennstoffe wie Holzprodukte und Biomasse ein niedriges CO₂-Äquivalent, wie es bei Fernwärme aus Holzhackschnitzel (0,091 kg/kWh) der Stadtwerke Tübingen (2021) angegeben wird. Generell entstehen durch nichtfossile Brennstoffe dieselbe Menge CO₂ wie bei fossilen Brennstoffen (Kohle, Erdgas oder Erdöl).

Allerdings bestehen Unterschiede in den maximalen feuerungstechnischen Wirkungsgraden der brennstoffspezifischen Verbrennungstechnologien und Heizsysteme, die die biochemisch gespeicherte Solarenergie freisetzen. Bei fossilen Heizkraftwerken ist auch zu berücksichtigen, wenn die Abwärme des Heizwerkes als Fernwärme weitergenutzt wird. Diese Abwärmennutzung verbessert die CO₂-Bilanz der Gesamtanlage. Jedoch ist sie deshalb nicht unbedingt *CO₂-neutral*. So ist die Verwendung von fossilen Brennstoffen (z.B. Kohlekraftwerk) durch diese Kompensationsmethode teilweise rechnerisch CO₂-neutral. Anders verhält es sich bei Anlagen, die die Abwärme der erzeugten Heizwärmemenge nicht weiterverwenden können. Hier müssen die CO₂-Mengen der Bilanz zugeschrieben werden (ebd.).

Kompensationsmöglichkeiten für CO₂-Emissionen bieten sich in vielerlei Hinsicht, indem CO₂ verursachende Maßnahmen durch eine CO₂-Reduktion an anderer Stelle *kompensiert* werden. Hier spricht man von den Netto-Emissionen, die sich rechnerisch in der CO₂-Bilanz ergeben und für das Klima relevant sind (myclimate 2020, myclimate 2021). Kritisch betrachtet wird die Möglichkeit, dass „übrige“ Netto-Emissionen auf dem Weg zur „Netto-Null-Bilanz“ durch Investitionen in Projekte zu Energieeffizienz von Anlagen, Kraftwerken oder Gebäuden oder für den Bau von emissionsfreien Kraftwerken dienen können. Dazu gehört vor allem die

Möglichkeit, seine gesamten CO₂-Emissionen durch Aktivitäten z.B. im Ausland zu kompensieren. Die Berechnung der CO₂-Kompensation birgt die Gefahr in sich, dass CO₂-Reduktionen mehrfach angerechnet werden, da Finanzierungen und Maßnahmen jeweils einzeln bewertet werden. Dabei werden CO₂-Reduktionszertifikate generiert, die keine echte und zusätzliche CO₂-Reduktion darstellen und mit einem Ablasshandel verglichen werden (FLACHSLAND et al. 2011, FORSTER 2017, WILLIAM e al. 2017, ZENKE & FUHR 2006).

Akteure können die Handlungsmöglichkeiten *Vermeiden und Kompensieren* im Rahmen ihres Budgets so kombinieren, dass die eigene angestrebte Form der Neutralität mit minimalen Kosten gesichert ist. Dafür sind eine komplexe Bilanzierung und Kontrolle einzuführen, die verursachte und vermiedene Emissionen dokumentiert. Allgemein anerkannte Klimakompensationen sind:

- dimensionierte Emissionsvermeidung durch technische Kompensation z. B. durch die Mitfinanzierung eines Projektes zur Gewinnung erneuerbarer Energie
- biotische Kompensation durch Finanzierung dauerhafter Kohlenstoffsenke
- Aufforstung, Kohlenstoffendlager beliebiger Modifikation oder chemischer Verbindung
- weitere Klimaschutzmaßnahmen zur Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks von konsumierten Gütern oder Dienstleistungen.

3.4.4. Von Monitoring bis Nutzer-Sensibilisierung

Zur Steigerung der Energieeffizienz von Landesbauten und zur Überwachung des Energiemanagements nach unterschiedlichen Normen investierte die Landesverwaltung in den letzten Jahren in ein modernisiertes und **zentrales Energie- und Medien-Informationssystem (EMIS)**. Dieses Programm ist über Schnittstellen mit anderen EDV-Systemen des Landes verbunden und erfasst alle Kosten- und Verbrauchsdaten der Landesbauten. Die regelmäßigen Verbrauchs- und Kostenerfassungen der zuständigen Ämter, Universitäten und Universitätskliniken mit der Einführung von EMIS und SAP bilden seit 2013 die Grundlage für diese Datenermittlung. Da bei der Verbrauchserfassung zuvor noch keine Differenzierung zwischen Strom, Wärme und Kälteerzeugung digital stattfand, wurde der Wärmeverbrauch als Endenergie ausgewiesen.

Mittlerweile wird der Wärmeverbrauch als Nutzenergie festgestellt und witterungsbereinigt auf die bundesweite Normgradtagzahl (3.883 Kd/a) und auf die Nutzfläche bezogen (MF BW 2013b). Weitere Zielformulierungen zur Modernisierung des Verwaltungssystems bezogen zukünftige Auswertungen, Erstkontrollen und Zielwerte für den Endenergieverbrauch mit ein. Auch aus diesem Grund wurden Vereinfachungen zur Erstellung einer Energiebilanz modernisiert. Die daraus ermittelten Kennzahlen wie z.B. Sonneneinstrahlungsvolumen, Erwärmungsgrade, Luftvolumen und Kühlungsbedarf werden bei Berechnungen mit einbezogen (BMUV 2017). Allerdings sind nur wenige Gebäudepläne digital vorhanden und so fehlen digitale Flächenpläne in CAD oder GIS-Formaten.

Mit der Energiebilanzierung sind auch die CO₂-Emissionen zu bestimmen. Die Ämter für Vermögen und Bau (VuB) errechnen die THG-Emissionen aus dem Heizenergieverbrauch und dem Elektroenergieverbrauch und geben den Gesamt-THG-Kennwert eines Gebäudes an. Dabei wird die Nettogrundfläche als Bezugsfläche verwendet und ein Emissionswert pro Quadratmeter und Jahr ausgewiesen kg THG/ (m²NGF x a)] (VuB BW 2008):

- ➔ **In dieser Arbeit wird die CO₂-Emissionen direkt aus dem Gesamtenergieverbrauch eines Gebäudes (tba 2015) berechnet. Die Bezugsfläche ist identisch mit der Grundfläche des Gebäudes.**
- ➔ **Der CO₂-Emissionswert wird ebenso pro m² /a ausgewiesen.**

Um das Klimaschutzziel - Senkung des Primärenergieverbrauchs - voranzutreiben, ist die Sensibilisierung der Nutzer wichtig. Es wird von 5 -15 % Einsparpotenzial durch sparsamen Umgang mit Strom und Wärmeenergie ausgegangen, die mit einer Umstellung auf energiesparende Endgeräte zusammenhängt. In den letzten Jahren wurden jährlich rund 100.000 Euro für Personalschulungen und Neueinstellungen im Gebäude- und Anlagenbetrieb bereitgestellt. Durch Fortbildungsoffensiven wurden die Anwendungsmöglichkeiten von Anlagen zur Nutzung erneuerbaren Energien forciert (MF BW 2009b, MF BW 2015a, MF BW 2020a, MF BW 2021a).

- ➔ **Hier werden die geeigneten Flächen dafür ausgewiesen.**
- ➔ **Allerdings setzt die Sensibilisierung von Nutzern für einen nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen allgemein ein *grundlegendes Verständnis für Umweltschutz* voraus. Fehlt es, sind die Bemühungen um Akzeptanz und Mitwirken an den Klimaschutzzielen mit großen Herausforderungen für diejenigen verbunden, die Funktionen wie Nachhaltigkeitsbeauftragte, Klimaschutzmanager und Multiplikatoren innehaben.**

3.5. Das wachsende Verantwortungsbewusstsein für Nachhaltigkeit

Mit der Veröffentlichung des Brundtland-Berichts 1979 kam die wissenschaftliche Nachhaltigkeitsdiskussion an den Hochschulen mehr Bedeutung zu. Ausgehend von der zivilgesellschaftlichen Ebene entwickelte sich eine Diskussion um den Transformationsprozess *Nachhaltige Entwicklung* (NE) und bettete diese Ziele verstärkt in einen sozialen und ökonomischen Rahmen ein. Allerdings wird eine *Große Transformation* des Weltsystems (nach Polanyi 1973) bis heute noch als unrealisierbar angesehen, lediglich eine sektorale Transformation sei realisierbar. Übertragen auf die aktuelle Energiewende, stellt sie eine sektorale Transformation des Energieversorgungssystems dar.

Seit den 70er Jahren diskutieren Bürger und Akteure unterschiedlich über erneuerbare Energiegewinnung. Trotz der Etablierung von Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsbeauftragten, ist die *Ökologisierung*, wie sie zunächst genannt wurde, zögerlich angelaufen. Die Bewusstseinsklärung und der steigende Wille, sich mit der dynamischen Verflechtung von Natur und Gesellschaft auseinanderzusetzen, ist Gegenstand der Nachhaltigkeits- und sozialökologischen Forschung. Die Gesellschaft steht vor der Herausforderung, eine Transformation weg von *Maximalprinzipien des dominierenden Wirtschaftsmodells* - mit den sich drastisch veränderten Umweltbedingungen und schrumpfender Ausgangssituation – hin zu *einem Minimalprinzip der reduzierten Moderne* - mit einem drastisch reduzierten Naturverbrauch und zunehmender Bevölkerungsdichte – zu bewerkstelligen (FILHO 2005, RENN 2007, EKARDT 2011, v. HAUFF 2014b).

Während des kapitalistischen Wachstums Ende der 1970er bis in die 90er Jahre waren Wertvorstellungen über soziale Verantwortung von Unternehmen gegenüber der Gesellschaft erst im Aufstreben und deshalb in ihrer Formulierung noch sehr vage, rückte aber zunehmend in den Vordergrund der Diskussion. Seit dem

Davoser Manifest des europäischen Management Forums (1973) erweiterte sich die Bereitschaft zur Selbstkontrolle von Unternehmen und drückte sich in der verschärften Formulierung des Verhaltenskodex aus: die *Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD)* formulierte Verhaltensregeln für multinationale Unternehmen, 1977 folgte die *Erklärung der Internationalen Arbeitsorganisation (ILO)* und der *Vereinten Nationen (ECOSOC)*, darauf folgte die umweltorientierte Unternehmensführung (Bundesverband Junger Unternehmer 1985) und der *Umweltcheckliste des Bundesdeutschen Arbeitskreises für umweltbewusstes Management (BAUM 1984)*.

Bereits mit Howard R. BOWENS „*Social responsibility of the business man*“ (1953) wurde die gesellschaftliche Verantwortung der Unternehmenswelt gefordert. In den 1960er Jahren stellten *Eells* und *Walton* die Handbücher zur *Corporate Social Responsibility* von Unternehmen bereits dazu vor. Da das Denken und Handeln von Privatunternehmern einer relativ autonomen Wirtschaftsordnung unterlag, beschränkte sich das Verantwortungsbewusstsein der Wirtschaft gegenüber der Gesellschaft überwiegend auf die Arbeitsplatzsicherung und ein dominierendes Gewinnstreben. Die soziale Verantwortung gegenüber der Gesellschaft wurde weiterhin als Einschränkung des Wirtschaftswachstums gesehen. Seit den 1990er Jahren folgten fachspezifische Verordnungen mit konkreten Maßnahmenanleitungen, die immer stärker in Produktions- und Herstellungsketten von Unternehmen eindringen. Die herrschende Resistenz der Management-Praxis gegenüber externen Forderungen wie Verantwortung gegenüber Verbrauchern, Arbeitnehmern, der Region und Gesellschaft, lockerte sich erst als die bisherige Autonomie der Unternehmensführung durch staatliche Eingriffe gefährdet zu sein schien. So wollte man dem lieber zuvorkommen (Staehe, 1994:585ff).

Auch innerhalb der Nachhaltigkeitsforschung wurde eine Abgrenzung zwischen den interagierenden Bereichen zunehmend kritisch betrachtet. In den verschiedenen Modellen (Drei-Säulen-Modell, Enquete-Kommission/Brundtland-Bericht (HAUFF, v. 1987); Dreiecks-Diagramm, (JÖRISSEN 1999); Vier-/Mehr-Säulenmodell; Agenda 21 & Tutzinger Manifest (2001); Gewichtetes Säulenmodell, Stahlmann 2008) werden die wirksamen Bereiche (Areas) in Säulen getrennt voneinander dargestellt. Im Gegensatz dazu stellte das *Modell der Nachhaltigkeitspyramide* (JANßEN, 2018) erstmals die Interaktion aller Bereiche dar: „...*(eine) Balance zwischen der ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension (wird) abgelehnt und stattdessen die planetaren Grenzen der Erde als limitierender Handlungsrahmen für Wirtschaft und Gesellschaft einerseits sowie als Voraussetzung für Wachstum und Lebensqualität andererseits (wird) anerkannt*“... (JANßEN, 2018:37ff). Unter *Corporate Social Responsibility (CSR)* basierend auf BOWENS (1953) wird heute ein *ganzheitliches und nachhaltiges Unternehmenskonzept* verstanden. Darunter wird überwiegend die soziale unternehmerische Gesellschaftsverantwortung verstanden.

Zeitgleich verpflichteten sich die Hochschulen mit dem Beschluss der *Copernicus Hochschul-Charta für eine nachhaltige Entwicklung*, die seit 1993 als internationale Leitfunktion für die nachhaltige Hochschulpolitik und als Selbstverpflichtungserklärung der Hochschulen gilt. Darin wurden die Bildungseinrichtungen aufgefordert, nachhaltige Bildung auf allen Ebenen zu fördern, um die ethische Verantwortung an zukünftige Entscheidungsträger und Lehrende weiterzugeben. Nach den Prinzipien der *Magna Charta of European Universities* und in Anlehnung an die UNCED-Empfehlungen für eine umwelt- und entwicklungsorientierte Bildung verpflichteten sich 30 Universitäten und Hochschulen (1998) dazu, die zehn Handlungsprinzipien umzusetzen. Auf lokaler Ebene wurde die Copernicus Hochschul-Charta durch die *Lokale Agenda 21* an den

Universitäten transformiert. Als solches ist sie ein wichtiges Instrument in der Selbstverpflichtung für nachhaltige Leitlinien.

Seit 25 Jahren ist *Bildung für nachhaltig Entwicklung (BNE)* in der Agenda 21 der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro und nach der UN-Dekade BNE von 2005-14 anerkannt. Zwar stellte die Lokale Agenda 21 einen noch nicht bindenden Aktionsplan für lokale nachhaltige Entwicklung dar, bewirkte aber eine große Bandbreite lokaler *Bottom-up* Initiativen, die aus ökosozialen Bewegungen entstanden sind. Erst die Umstrukturierung des *Bologna Prozesses* ermöglichte die Aufnahme neuer Bildungsangebote. Unterstützt durch den Beschluss des Nationalen Aktionsplans „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ wurde BNE verstärkt im Deutschen Bildungssystem umgesetzt.

Vom *Rat für Nachhaltige Entwicklung* wurde am 13. Oktober 2011 (c/o mit der Deutschen Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ)) der *Deutsche Nachhaltigkeitskodex (DNK)* als Maßstab für nachhaltiges Wirtschaften beschlossen. Die EU-Kommission hat ebenfalls beschlossen, dass Unternehmen ab 2016 eine nicht finanzielle Berichterstattung abzugeben haben. Darin wird global tätigen Unternehmen die Berichterstattung nach internationalen Standards empfohlen, um sich damit durch einen vergleichbaren und transparenten *Sustainability code* bewerten zu lassen (RfNE 2015).

Der DNK stellt eine selbst auferlegte Richtlinie für *gute Unternehmensführung* dar, die bisher noch keine weitere Verbindlichkeit besitzt. In Form von Leitlinien haben Unternehmen ihre Grundeinstellung, die Gründungsidee und Betriebsform sowie die Art und Weise der Zielerreichungsstrategie zu formulieren. Als Selbstverpflichtung erklären Unternehmen zu 20 Kriterien ihre ökologischen, sozialen und ökonomischen Werte für nachhaltige Entwicklung und stellen ihre Strategie, Prozessmanagement, Umwelt und Gesellschaft vor. Defizite bieten die Möglichkeit noch auszubauende Bereiche und Herausforderungen zu benennen, damit eine Bewertung des Fortschritts durch den Rat stattfinden kann. Neben einer allgemeinen Aufklärung verlangt der DNK Angaben zur Bereitschaft *guter Unternehmensführung* und der Teilnahme an gesellschaftlichen Debatten und die Einhaltung des *Corporate-Governance-Kodex* des DNK. Mit Hilfe von quantifizierbaren Leistungsindikatoren wird die branchenspezifische Vergleichbarkeit erhöht. Diese Indikatoren wurden von der *Global Reporting Initiative (GRI)* und der *European Federation of Financial Analysis Societies (EFTAS)* entwickelt, die als kompatible Zertifizierungsverfahren gelten und einschlägige Informationen fordern. Diese fungieren als rechtlich verbindliche Vorschriften und können ebenso bei weiteren Zertifizierungsverfahren beim DNK eingereicht werden (RfNE 2015).

Für eine Bewertung der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen und der Verursachung klimarelevanter Emissionen müssen nach dem DNK die Höhe, Umfang und Umgang mit Recycling angegeben werden. Zum Ressourcenverbrauch werden Gewichtsangaben, Volumen, Energieverbrauch in kWh, Liter und Gewichte im Verhältnis zum Gesamtressourcenverbrauch und Energieverbrauch gesetzt. Dazu müssen die THG-Emissionen angegeben werden, und die hierfür verwendeten Ermittlungs- und Rechenwege offengelegt werden (RfNE: 2015).

Die *Agenda 2030* – auch die *Sustainable Development Goals (SDGS)* genannt – wurde 2015 von 193 Mitgliedsstaaten der Vereinten Nationen (UN) verabschiedet. Darin sind 17 *globale Zukunftsziele für nachhaltige Entwicklung* bestimmt, die sich auf die Handlungsfelder Wirtschaft, Soziales, Umwelt und Finanzpolitik, Agrar, Verbraucher, Verkehr, Städtebau, Bildung und Gesundheit beziehen. Im Rahmen der *Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie* legte die Bundesregierung 2017 konkret 63 Ziele fest, durch deren

Umsetzung Deutschland innerhalb der Industrieländer eine Vorreiterrolle bei der Umsetzung der SDGs einnehmen soll. Allerdings stellen die SDGs die Mitgliedsstaaten vor unterschiedliche Herausforderungen, die zunächst nicht so abzusehen waren: Erst taten sich die Industrieländer bei der Konzeption leichter, da sie eben nicht mehr mit der *reinen Schaffung basaler Versorgungsstrukturen* beschäftigt sind und eine Demokratisierung weitestgehend vollzogen haben. Der Gestaltungsfreiraum, den Industrieländer besitzen und der aus ihrer etablierten Lage entstand - nämlich bereits Grundlegendes geschaffen und stabilisiert zu haben - fordert eine kritische Auseinandersetzung mit dem Erreichten in Richtung Nachhaltigkeit (Filho 2015:26). Zugleich stehen die Industrieländer wegen ihrer etablierten und damit teils festgefahrenen Strukturen sowie ihrer Abhängigkeit von weiterem Wirtschaftswachstum vor einer größeren systemischen Transformation als dies bei Schwellen- und Entwicklungsländern zu beobachten ist. Doch stellt gerade der Kohleabbau aktuell ein Diskussionsthema dar, da einige Länder noch keine energietechnische Infrastruktur aufgebaut haben, die die Einspeisung oder punktueller Nutzung von erneuerbaren Energien kostengünstiger ermöglichen würde (UN 2018).

Mit der Beschließung des deutschen Lieferkettengesetzes Ende 2021 wurde eine lange Debatte über die menschenrechtsbezogenen Sorgfaltspflichten und Umweltschutz für Unternehmen in Teilen festgeschrieben. Damit endet auch die freiwillige Selbstverpflichtung, die mit dem *Nationalen Aktionsplan für Wirtschaft und Menschenrechte (NAP)* seit 2015 galt und wenig Erfolg erzielte. Es wurden vereinheitlichte und sozial gerechte Wettbewerbsbedingungen für Unternehmen angestrebt. Allerdings sind die Vorgaben zunächst auf bestimmte Unternehmensgrößen beschränkt, die einer Nachweispflicht nachgehen müssen, zudem sind abgestufte Verantwortungsbereiche bestimmt worden. Die Einhaltung der Menschenrechte bei Unternehmen und deren Zulieferer wird vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) kontrolliert und mit Bußgeldern kontrolliert. Allerdings fiel der beschlossene Gesetzesentwurf milder aus als ursprünglich entworfen, da die Haftungsregeln entschärft wurden. Auch soll das Gesetz zunächst nur für etwa 600 deutsche Unternehmen mit mehr als 3.000 Mitarbeitern gelten. Erst in einer zweiten Stufe – ab 2024 – sind verbindliche Vorgaben dann auch für kleine Unternehmen mit mindestens 1.000 Beschäftigten vorgesehen, von denen es knapp 2.900 gibt. Das Gesetz soll Anfang 2023 in Kraft treten.

- ➔ **Die Selbstverpflichtung hängt besonders von der Haltung der Entscheidungsträger ab, ob sie diesen Richtlinien nachgehen wollen und bereit sind die erforderlichen Investitionen zu tätigen. Diese Verantwortung teilt sich auf die Führung der Universitäten und Hochschulen und die zuständigen Ämter für Vermögen und Bau auf.**
- ➔ **Allgemein nimmt die Bedeutung der freiwilligen Selbstverpflichtung international zu. Das Engagement in dieser Richtung von Unternehmen und Institutionen wird zunehmend erwartet.**

Das zukünftige Lieferkettengesetz wirkt bereits indirekten Einfluss auf EMAS aus, dass dem freiwilligen europäischen Umweltmanagement- und Auditsystem in den Anforderungen dem EMAS-System ähnelt. Deshalb befassen sich zunehmend auch Bildungseinrichtungen - wie Universitäten - mit den indirekten Auswirkungen von Prozessen und analysieren Umweltaspekte in den Lieferketten während der Zertifizierung über eine Lebenswegbetrachtung. Dadurch werden Verbesserungsprozesse angestoßen. Die zukünftige Integration weiterer menschenrechtlicher Aspekte bei Zertifizierungen sei naheliegend. So empfiehlt der DNK eine Kombination der Richtlinien für EMAS, CSR und NE für zukünftige EMAS-Zertifizierungen (RFNE 2021, WOLFERSDORFF, v. 2021).

3.5.1. Nachhaltigkeit an deutschen Hochschulen – Das Netzwerk HOCHN

Bundesweit schließen sich Studierende Nachhaltigkeitsbewegungen an und fordern nachhaltige Lehrinhalte im neuen Bildungssystem. Bereits 2012 bauten junge Menschen das *Netzwerk N e.V.* auf, das auf einer digitalen Plattform konkrete Handlungsfelder und Beispiele für ein *Gelingen aus Lehre, Governance, Betrieb und Forschung* definiert (*Netzwerk n e.V.* 2016). Damit drückten studentische Initiativen ihre Forderungen und Wünsche an eine nachhaltige Hochschule aus. Ebenso positionierte sich *sneep e.V.* gemeinsam mit den *Netzwerk n e.V.*, *Weitblick e.V.* und *Was bildet ihr uns ein? e.V.* in ihrem Forderungspapier „Nachhaltigkeit und Ethik an Hochschulen – Initiative für Nachhaltigkeit und Ethik an Hochschulen“ und rief die Bundesregierung darin auf, das Bildungssystem entsprechend den bevorstehenden Herausforderungen auszurichten und finanziell aufzurüsten (*sneep e.V.* 2018).

Darauf aufbauend wurde das Verbundprojekt HOCH^N (2016 – 2018) vom BMBF (FONA) gefördert. In einer fünfteiligen Publikation zu den einzelnen Handlungsfeldern sind Berichte der Arbeitspakete zusammengefasst, die in einen Gesamtleitfaden des Hochschulnetzwerkes für nachhaltige Entwicklung an deutschen Hochschulen integriert werden. Darin sind Best-Practice Beispiele, Merkmale der Verwaltungs- und Wissenschaftsstrukturen, Vorlagen für Checklisten, Fragebögen und Anwendungsverfahren enthalten (Bassen et al 2018). In der Veröffentlichung „*Nachhaltigkeit an Hochschulen: entwickeln – vernetzen – errichten (HOCH^N)*“ des Förderprojekts werden die Akteure, Stakeholder und Kooperationspartner vorgestellt, die in Austauschbeziehungen (Transfer) mit Hochschulen stehen und eine große Reichweite der Vernetzungen aufzeigt, die deren Einflussmöglichkeiten betont (BASSEN et al. 2018, BMBF 2012, BORMANN 2018, siehe auch HOCH^N 2018).

Weiter zeigt der Bericht „*Nachhaltigkeitsgovernance an Hochschulen*“ die unterschiedlichen Strukturen der Hochschulen auf. Daraus geht eine eingeschränkte Übertragbarkeit von Best-Practice-Cases hervor, die verdeutlicht, wie deutsche Hochschulen in ihrem Transformationsprozess auf sich alleine gestellt sind und von einem intensiven Erfahrungsaustausch mit anderen Hochschulen abhängen. Die Darstellung der bestehenden Netzwerke für Erkenntnisgewinne und für die Bündelung von Kräften durch selbstorganisierte Initiativen zeigt das hohe Interesse und Engagement für Nachhaltigkeitsthemen. Dabei wurde deutlich, dass für eine erfolgreiche Umsetzung eine übergreifende Steuerung erforderlich ist, die in die Verwaltungsstrukturen der Hochschulen eingreift und Zuständigkeiten schafft oder neue Aufgaben bestehenden Bereichen zuweist. So wird weiterhin eine klare *top-down*-Anweisung erforderlich, die Rückendeckung durch Rektorat und Kanzlerschaft für eine *agile Organisationsstruktur* signalisiert. Insbesondere bei Fragen zu Finanzierungen und Zuständigkeiten sind neue Lösungsansätze für rasche Umsetzungsvorschläge entstanden (nach BASSEN et al: In HOCH^N 2018, siehe auch GEIGEL & WEISSER 2016).

Dafür hat sich das Verbundprojekt HOCH^N zum Ziel gemacht, Hochschulen auf ihrem individuellen Weg zu unterstützen, damit ein Orientierungsrahmen zur gesamtinstitutionellen Integration und Umsetzung von Nachhaltigkeit als ethisches Prinzip in Theorie und Praxis erarbeitet werden kann (Abb. 32). Wegen der Unterschiedlichkeit deutscher Hochschulen gibt es dafür kein Patentrezept. Jedoch sind die vier Hauptaufgaben in ihren Zielen konform. Das HOCH^N-Projekt besteht aus dem Forschungsvorhaben von elf deutschen Hochschulen sowie wachsenden Nachhaltigkeitsnetzwerken deutscher Hochschulen, in dem 100 deutsche Hochschulen am Austausch teilnehmen. Dazu gehören Forschungsgruppen, Kollaborationstreffen,

Konferenzen, Nachwuchsgruppen und -akteure. Es benötigt ein etabliertes Netzwerk, ein gemeinsames Verständnis, eine Maßnahmenkatalog und einen Leitfaden (ebd.):

Zielsetzung HOCH ^N : Förderung nachhaltiger Entwicklung an Hochschulen			
Teilziel 1:	Teilziel 2:	Teilziel 3:	Teilziel 4:
Etablierung eines Netzwerks zum Erfahrungsaustausch	Entwicklung eines gemeinsamen Nachhaltigkeitsverständnisses	Förderung nachhaltiger Hochschulentwicklung sowie Maßnahmenableitung	Leitfadenerstellung zur nachhaltigen Hochschulentwicklung
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gründung des Netzwerks ✓ Erfahrungsaustausch ✓ Vernetzung Forschung und Praxis ✓ Vernetzung mit internationalen Initiativen 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Entwicklung gemeinsamer Eckpunkte ✓ Konkretisierung unterschiedlicher Ausprägungen ✓ Identifizierung von Bezugsparametern für Nachhaltigkeit an Hochschulen 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ableitung konkreter Themen- und Aktionsbereiche sowie Maßnahmen innerhalb der Handlungsfelder Forschung, Lehre, Betrieb, Governance und Nachhaltigkeitsberichterstattung 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Leitfadenerstellung zur nachhaltigen Hochschulentwicklung innerhalb dieser fünf Handlungsfelder

Abb. 32: Projektziele HOCH^N (BASSEN et al, 2018: 66)

3.5.2. Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)

Um für die zukünftigen Herausforderungen gewappnet zu sein, benötigt der Mensch nach HOCHN (2018) ein Grundverständnis von Nachhaltiger Entwicklung, um zukunftsfähig denken und handeln zu können: *„Nachhaltigkeit ist eine drängende gesellschaftliche Entwicklungsaufgabe, die immer mehr in den Fokus rückt.“* (HOCH^N 2018:12). Deshalb fördert BNE verantwortungsvolles Bewusstsein, um die Auswirkungen des eigenen Handelns auf die Umwelt und den Menschen im globalen Kontext zu verstehen und verantwortungsvolle Entscheidungen treffen zu können. Über dieses Grundverständnis hinaus befähigt BNE die ökologischen, sozialen, ökonomischen und kulturellen Aspekte in ihrer Gesamtheit zu betrachten und Wege für Veränderung zu finden. Dies ist nur durch Partizipation, Kommunikations- und Abstimmungsmethoden möglich. Denn *„Nachhaltigkeit ist ein normatives Prinzip, das sich als Maßstab einer globalen und intergenerationellen Gerechtigkeit angesichts der Herausforderungen des gegenwärtigen Wandels des Erdsystems umschreiben lässt.“* Und weiter *„zielt BNE auf die Stärkung von Kompetenzen, die für die Mitgestaltung des gesellschaftlichen Lebens nötig sind...(.)... Ihre systemisch integrierte Umsetzung wird als Anspruch einer umfassenden gesellschaftlichen Transformation verstanden, dessen Kern ein Wandel der Verhältnisse des Menschen zur Natur ist.“*

Für die Erlangung neuer Kompetenzen strebt BNE eine breite Implementierung der Lehrinhalte an Hochschulen und eine Verstetigung im Lehrsystem an. Für Studierende sollte erkennbar sein, dass BNE über das eigene Fachwissen hinaus zu kritischem Bewerten befähigt und erst dadurch zukunftsfähige Kompetenzen erworben werden, die mit ethischen Werten zu verknüpfen sind, um eine nachhaltige Weltanschauung durch eigene Entscheidungen verfolgen zu können, wie sie beispielsweise an der Universität Tübingen im Rahmen eines Studium Oekologikums¹⁸ vermittelt werden. Diese Transformation der *Lehr- und*

¹⁸Greening the University (Hrsg.), Perspektiven für eine nachhaltige Hochschule, Studierenden Initiative Universität Tübingen, Oekom Verlag 2009

Lern-Umgebung hin zu *Knowing-Acting-Beeing* ist notwendig, um inhaltlich die BNE-Qualitätsmerkmale zu erfüllen (BAERLÖCHER 2013, MEISCH 2015, BELLINA 2018, NÖRTING 2018, POTTHAST 2020).

BNE hat sich in einem spezifischen historisch-politischen-kulturellen Rahmen entwickelt und erforscht auch die Ursachen globaler Ungerechtigkeiten. Um diesen global entgegenzuwirken benötigt es wissenschaftliche Erkenntnisse, um die *Grand-Challenges* dieser Zeit anzugehen und Studierende ebenfalls dazu zu befähigen innovativ zu forschen und neues Wissen zu generieren. Dabei spielt die Ermittlung einer normativen Orientierung eine zentrale Rolle, ohne die die Einordnung früherer gesellschaftspolitischer und wirtschaftsunternehmerischen Fehler nicht als solche erkannt und behoben werden können. Die Motivation hinter Entscheidungen beziehen sich auf das, was im Kontext dieser Werte und Normen als erstrebenswert bewertet wird. Dabei darf keine Indoktrination geschehen, sondern durch Fachwissen eine Notwendigkeit neuer Werte als evident erscheinen. Die Hochschulbildung braucht deshalb die ethische Bildung um bisherige Werte und Normen weiter zu hinterfragen. Dann können *Grand-Challenges* auch angegangen und die inhärente Spannung zwischen Normativität und Neutralität konstruktiv genutzt werden (nach Barth: IN HOCH^N 2018).

Bezugnehmend auf Abbildung 33 sind für BNE-Kompetenz drei Bereiche miteinander zu verknüpfen. Es zählt im emanzipatorischen Ansatz zu den BNE-Kompetenzen, wenn:

1. das **Verständnis** über verschiedene Normative und ihre Konsequenzen gegeneinander abgewogen werden kann.
2. kritisch, kreativ und visionär gedacht wird, um Paradigmen hinterfragen und neue Lösungswege entwickeln zu können, die eine **Veränderung** bewirken können.
3. Das **Handeln** ein Change-Management initiiert.

Eigene Lehrinhalte sind in BNE enthalten in Form von integrativen Betrachtungsweisen, die als eigenständige Fachdisziplin normative und neutrale Lerninhalte zu einer Kompetenzbildung vermittelt und jede Fachdisziplin ergänzt. Dazu zählten integrative Betrachtungen, die neben ökologischen auch soziale, ökonomische und kulturelle Interdependenzen erkennen. Ein Blick über den Tellerrand und die Bereitschaft aller Wissenschaftsdisziplinen, sich einem Diskurs über NE zu stellen und den eigenen Diskurs von NE aus ihrer Fachperspektive mitzugestalten, ist die richtige Herangehensweise. NE und BNE arbeiten daran, den gesellschaftlichen Narrativ anzuerkennen und darin weder eine Freiheitsberaubung in der Wissenschaft noch eine Indoktrination zu verstehen. Deshalb geht BNE von einem themen- und /oder problembasierten Ansatz aus und zeigt daran die Rolle verschiedene Fachdisziplinen, die mit ihren Forschungsmethoden im Kontext zu BNE lehren, um für alle Arbeitsbereiche und Lebensbereiche adaptierbar zu bleiben. Aus diesem Grund sind die Anforderungen an Facharbeiten zu nachhaltigen Themen heute mit weiteren Ansprüchen besetzt.

- Indem wissenschaftliche Arbeiten interdisziplinär ausgerichtet werden, können sie verstärkt den Bezug zu Nachhaltigkeit herstellen und neue Konzepte herleiten.
- Die Herausarbeitung von fachlichen Schnittstellen erfordert auch eine empirische Herangehensweise, da Methoden noch nicht etabliert sind.
- Das Sichtbarmachen solcher Schnittstellen zeigt systembedingte Schwachstellen auf.
- Nur mit der Aufarbeitung dieser Schwachstellen können neue Herangehensweisen innerhalb des wissenschaftlichen Anspruchs bestehen und ihren eigenen wissenschaftlichen Wert verteidigen.

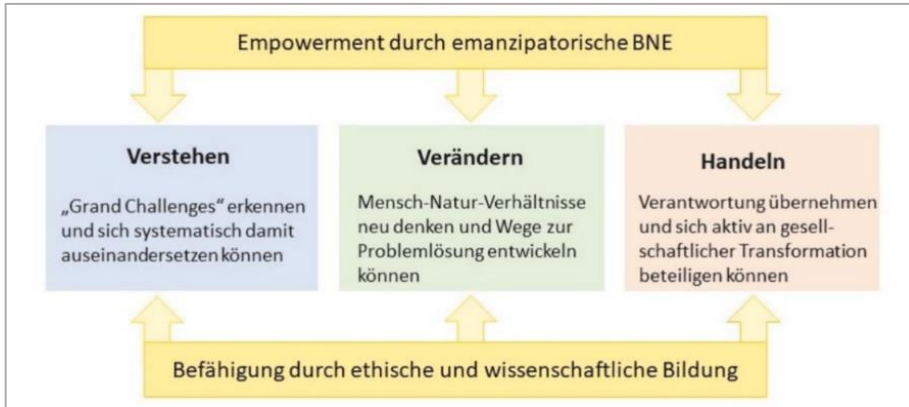


Abb. 33: Ziele der Hochschul-BNE (HOCH^N 2018: 31)

- ➔ Hier wird abgeleitet, dass Wissenschaft neue Methoden braucht, die diese Aushandlungsprozesse zu gestalten wissen. Dazu zählen sogenannte Change-Agents (Nachhaltigkeits-Transformations-Akteure), die über diese Kernkompetenzen verfügen (NÖLTING 2018).

3.5.3. Von nachhaltig zu klimaneutral - ein weiter Weg?

Auf die Frage, wie es Universitäten und Hochschulen gelingen kann, den komplexen Prozess einer nachhaltigen Entwicklung innerhalb der eigenen Institution anzustoßen, aufrecht zu erhalten und zu einer dauerhaften Aufgabe zu machen, besteht noch „kein Konsens darüber, wie der aus gesellschaftlicher Verantwortung begründete Anspruch von Nachhaltigkeit im Kontext von Hochschulen verstanden, ausgestaltet und umgesetzt werden soll“ (HOCH^N 2018:18). Aufgrund der hohen Diversität deutscher Bildungseinrichtungen gibt es wenig übertragbare Beispiele, die jeweils vor eigenen Herausforderungen steht. Die deutschen Hochschulen unterscheiden sich in:

- der Rechtsform (privat und öffentlich)
- des Typs (Universität, Fachhochschule, Hochschule für angewandte Wissenschaften)
- der Lage (ländlicher Raum oder Metropolregion)
- der Größe (kleine spezialisierte oder große Volluniversität)
- je Bundesland andere Rahmenbedingungen in Bildung und Finanzierung



Abb. 34: Aktivitäten des Wertschöpfungskreises einer Hochschule (Bassen 2017: 66)

Allen gemeinsam sind die Hauptaufgaben und Zuständigkeitsbereiche, wie sie in Abb. 34 dargestellt sind. Generell stellt HOCH^N explizit für Hochschulen eine Gesamtdarstellung möglicher Maßnahmen und Prozesse vor, die sich zusammengefasst übertragen lassen und nach Bausteinen mögliche Rahmenelemente aufzeigen und sich auf drei Bereiche an Hochschulen beziehen:

- Selbstverpflichtung in Form eines konkreten Leitbildes zu Nachhaltigkeit
- Haushaltsverwendung für nachhaltiges Beschaffungs-, Energie und Verkehrsmanagement
- Initiativen Förderung zur Beschleunigung der Optimierung von Verwaltungsstrukturen durch zusätzliche Aktivitäten, Ehrenamtliche, Studierende.

In Abbildung 35 sind die Interaktionen zwischen den einzelnen Bereichen des Hochschulbetriebs sichtbar. Die Verwaltung der Liegenschaften und der Bereich Bildung & Transfer hängen mit den Bereichen der externen Kooperationen zusammen, wo die meisten Schnittstellen zu Nachhaltigkeit und Klimaschutz bestehen. Die Konzeption agiler Organisationsentwicklung durch innovative Umsetzungsmöglichkeiten ist von essentieller Bedeutung um Nachhaltigkeitsprozesse zu etablieren.

Der Bericht „Anwendung des hochschulspezifischen Nachhaltigkeitskodex – ein Weg zur Nachhaltigkeitsberichterstattung an Hochschulen“ beinhaltet die Zusammenfassung aller unterstützenden Faktoren und der Hindernisse. Deshalb wurden Leitfäden für die Hochschulleitung erarbeitet, die die Vorteile des Nachhaltigkeitsengagements für die Zukunftsfähigkeit der Hochschule darlegen und Argumente für Investitionen liefern. Dabei werden Steuerungstools im Management aufgezeigt und Möglichkeiten für agile Organisationsstrukturen (BASSEN 2018).

Um die angestrebte und erreichte Nachhaltigkeit nachweisbar - messbar und belegbar zu gestalten, sind in der Wissenschaft Indikatoren für Nachhaltigkeit definiert worden und bestehende Herausforderungen angesprochen worden. Die Messung von Erfolgen und die Entwicklung von aussagekräftigen Nachhaltigkeits- und Klimaschutzindikatoren ist essentiell WINKELMANN 2015, MÜLLER-CHRIST 2014, BRAUWEILER 2017)

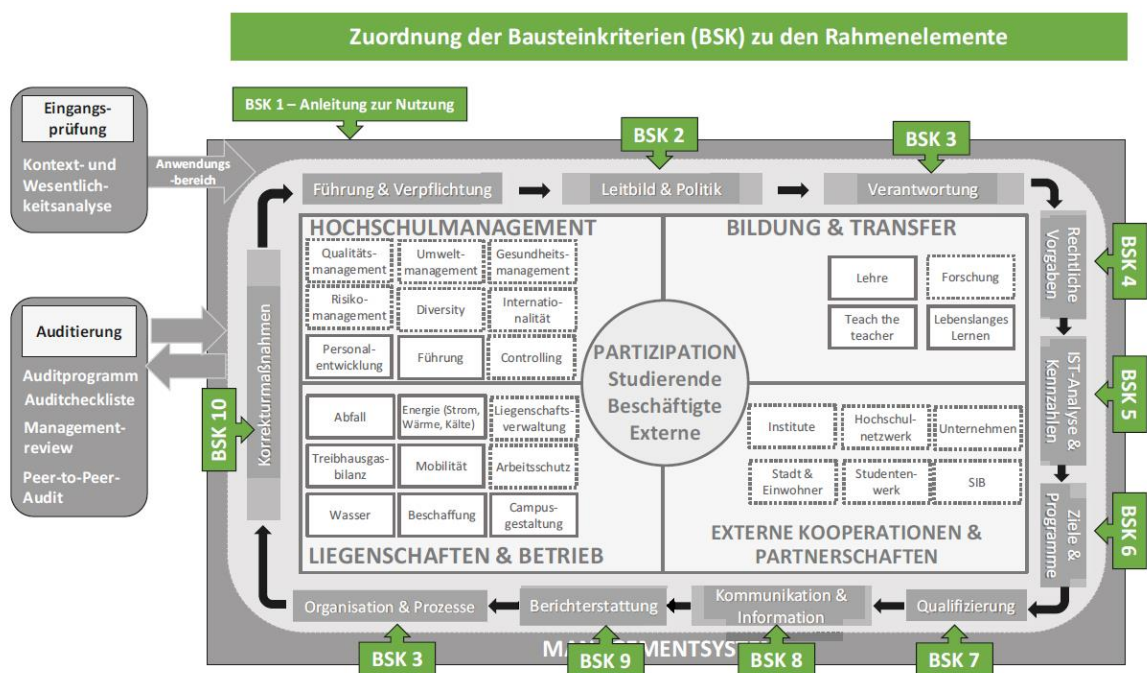


Abb. 35: Kriterien für die Ausgestaltung der Bausteine (HOCH^N 2018: 20)

Nach den vorangegangenen Ausführungen sollen die interdisziplinären Fragestellungen abschließend zusammengeführt werden:

- Mit der Messbarkeit durch Nachhaltigkeitsindikatoren wird ein übergeordnetes System für ganzheitliche Nachhaltigkeit angestrebt. Dieses Ziel ist ebenso komplex und weitreichend wie die dargestellte Bestimmung der CO₂-Äquivalente, die sich Produktions- bzw. Lieferketten errechnen.
- Bei den Nachhaltigkeitsindikatoren besteht der Vorteil allerdings darin, dass bestimmte Bereiche, die dem Qualitätsmanagement zugeordnet werden können (z.B. Beschaffungsfragen uvm) - in sich abgrenzbar sind.

→ Allerdings sind sie das nur vordergründig, denn mit der Erweiterung der EMAS-Zertifizierung um das Lieferkettengesetz, werden in Zukunft neue globale Anforderungen hinzukommen, die ebenfalls durch Nachhaltigkeitsindikatoren abzudecken sind. Hier wird eine Anpassung der Indikatoren notwendig sein, die bisher noch nicht festgelegt ist (WOLFERSDORFF 2021).

→ Der Weg zu einer nachhaltigen Hochschule ist ein weiter Weg, der vor allem von der Messbarkeit der Nachhaltigkeit abhängig ist.

Mit dem Koalitionsvertrag (4/2021) hat Land Baden-Württemberg das Klimaschutzgesetz für Baden-Württemberg (KSG BW vom 12. Oktober 2021) verschärft. Darin wird das Ziel der Landesverwaltung bis zum Jahr 2030 klimaneutral zu werden verankert. Die Vorbildfunktion wird in erster Instanz direkt bei den Universitäten und Hochschulen abverlangt (Musterleistungsbild), die in fünf Punkten umzusetzen ist (MUK BW 2021a, MUK BW 2021b, MF BW 2021a):

- durch ein effizientes Flächenmanagement
- Sanierung vor Neubau
- Fortschreibung der Priorisierungs-Systematik im Bauprogramm
- Weiterentwicklung Energieversorgungsanlagen
- Standortbezogene Energie- und Klimaschutzkonzepte der Hochschulen.

Seit 2021 haben sich die Hochschulen dazu verpflichtet bis 2030 klimaneutral zu werden. Dabei sind ihre eigenen Verwaltungsstrukturen Umstrukturierungen unterworfen, um neue Aufgabenbereiche zu etablieren. Die Klimaschutzziele verlangen in allen Verwaltungsbereichen neue Maßnahmen ab, die unter Zeitdruck umzusetzen sind, damit diese Vereinbarung eingehalten werden kann. Dazu ist Change-Management gefragt (MF BW 2021c).

4. Forschungsdefizit

Vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele 2030 sind diese Fragestellungen in einem Gesamtkontext zu betrachten. Hier liegen fachliche Schnittstellen zwischen der Geographie der erneuerbaren Energien, der Geoinformatik und des Klimaschutzes im Gebäudesektor. Das Untersuchungsgebiet umfasst die von der Universität und des Klinikums genutzten Gebäude, deren Sanierungsbedarf eine Standortuntersuchung für erneuerbare Energien erforderte, um deren Nutzung auszubauen und die Möglichkeiten, die Energieversorgung stetig fossil-freier zu gestalten und die Klimaschutzziele 2030 des Landes Baden-Württembergs zu erreichen.

Es wurde ein interdisziplinärer Forschungsstand zusammengestellt, der die wissenschaftliche und politische Diskussion beleuchtet und die abgeleiteten Forschungsfragen begründet. Das Forschungsdefizit liegt in der aktuellen Situation begründet, die durch die angestrebten Klimaschutzziele des Landes Baden-Württembergs entsteht. Hier setzt diese Dissertation an, indem der Versuch unternommen wird, anhand von wissenschaftlich erhobenen Geo- und Gebäudedaten erforderliche Kennzahlen zu ermitteln und geeignete Indikatoren abzuleiten, die eine Umsetzung der Klimaschutzziele durch eine geeignete Flächennutzung unterstützt und beispielhaft aufstellt. Um diesem Ziel im Bereich Energieversorgung mit eigenen Berechnungen zuzuarbeiten, ist diese Arbeit aufgebaut.

Die Landesregierung von Baden-Württemberg strebt eine Vorreiterrolle in der Umsetzung der Klimaschutzziele an. Der Gebäudebestand der Landesverwaltung soll bis 2030 klimaneutral gestaltet sein. Nicht CO₂-neutral, nicht CO₂-frei, sondern klimaneutral. Im Energie- und Klimaschutzkonzept für landeseigene Liegenschaften stehen insbesondere die Universitäten und Hochschulen als Musterleistungsbild im Fokus der Öffentlichkeit. Werden die zuständigen Ämter für Vermögen und Bau eine Umsetzung der Klimaschutzziele in ihren Regionen schaffen und die Treibhausgasemissionen reduzieren und vollständig kompensieren, sodass Netto-Null-Emissionen nachgewiesen werden?

Ob eine Universität *Klimaneutralität* erreichen kann, wirft Fragen auf:

1. Reichen die Flächen für dieses Ziel aus?
2. Verfügt die Universitätsgebäude über ausreichend erneuerbares Energiepotenzial?
3. Wie können Flächen nach ihrem Energiepotenzial bewertet werden?
4. Wie kann ihr möglicher Beitrag zu CO₂₀₃₀ gemessen werden?

➔ **Was bedeutet das in CO₂-Emissionen in der Versorgung mit erneuerbaren Energien und für die Kompensationsmaßnahmen, die durch Investitionen und Umrechnungen stattfinden werden?**

➔ **Um mit dieser Arbeit den Blick auf das CO₂-Einsparpotenzial zu lenken, werden Flächen neu bewertet und ihr CO₂-Flächenpotenzial mithilfe geographischer Informationssysteme klassifiziert und in Karten visualisiert.**

➔ **Die Klimaschutzziele werden auf das Untersuchungsgebiet übertragen. Modellhaft wird am Gebäudebestand der Universität Tübingen ein Stufenplan vorgestellt und abgeleitet.**

- **Anregungen für einen *Energetischen Flächennutzungsplan (E-FNP)*, der auch als Emissions-Fahrplan nach CO₂-Einsparpotenzial fungieren kann, um Entscheidungsträgern innovative Anregungen im Umgang mit den CO₂-Klimaschutzziele zu liefern?**

Der Forschungsbeitrag dieser Arbeit will beantworten, **ob** mit den vorhandenen Daten in Tübingen und mit Hilfe eines interaktiven Planspiels sinnvolle Standortbewertungen durchgeführt werden können und **wie** gut diese Ergebnisse weiterverwertbar sind. Der große Gebäudebestand soll auf seine Umsetzbarkeit der Klimaschutzziele untersucht werden, indem die verfügbaren Flächen auch nach ihrem Wert für Steuererminderung ausgewiesen werden.

- **Hier wird der Bogen zum interdisziplinären Forschungsstand gespannt: Um die Klimaschutzziele zu erreichen, müssen viele einzelne Rädchen zusammenarbeiten, damit eine Umsetzung klimaschützender Maßnahmen wie CO₂-Einsparungen durch erneuerbare Energien in den Bildungseinrichtungen selbst umgesetzt werden können.**

Es wird zusammengefasst: Die *Geographie der erneuerbaren Energien* behandelt Standorte nach Ressource und infrastruktureller Erschließbarkeit des erneuerbaren Energiepotenziales. Hierzu ermittelt die physische Geographie in erster Instanz die klimatischen Bedingungen und die natürlichen Potenziale eines Gebietes. Daraus ergeben sich Standortbewertungen nach Eignung zur Energiegewinnung und der Errichtung von Energiegewinnungsanlagen. In Zukunft nimmt die Bedeutung von Flächen für CO₂-Kompensationsmaßnahmen zu. Aus diesem Grund wird der Forschungsbedarf in neuen Ansätzen für Flächenbewertungen nach energetischen und CO₂-Werten gesehen und dazu werden unterschiedliche Berechnungen und Darstellungen abgeleitet.

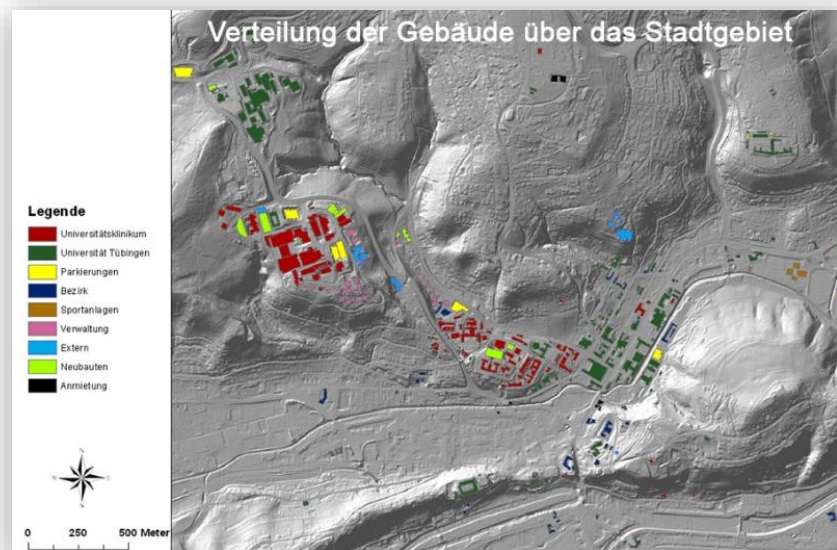
5. Vorstellung des Untersuchungsgebiets in Tübingen

Das Land Baden-Württemberg ist Träger der Eberhardt-Karls-Universität Tübingen. Universität (UT) und Universitätsklinikum (UKT) nutzen ca. 380 landeseigene Gebäude in Tübingen. Sämtliche Aufgaben des Immobilien-, Gebäude- und Baumanagements liegen beim Landesbetrieb Vermögen- und Bau Baden-Württemberg (VuB), der die Liegenschaften des Landes betreut und Baumaßnahmen im Bereich des Staatlichen Hochbaus für das Land durchführt. Für die Planung von Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen ist das Amt für Vermögen und Bau in Tübingen zuständig. Der genutzte Gebäudebestand weist neben einem hohen Anteil denkmalgeschützter Gebäude auch einen hohen Sanierungsbedarf auf, deren gesetzliche Auflagen bei der Umsetzung zu kostenintensiven Baumaßnahmen beiträgt.

5.1. Entwicklungen im Gebäudebestand

Der Tübinger Stadtkern ist von Zerstörungen des letzten Krieges nahezu verschont geblieben, weshalb die Stadt Tübingen für schützenswerte historische Gebäude eine Stadtbildsatzung (2008) mit detaillierten Bauvorschriften vorgibt. Durch historisch gewachsene Stadtstrukturen und zugewiesene Areale der Universität konzentrieren sich einzelne Fachbereiche in Gebäudekomplexen. Diese Gebäudekomplexe sind die Morgenstelle, die Naturwissenschaftlichen Institute, die Schnarrenberg Kliniken, die Talkliniken, die Medizinischen Lehrgebäude, die Sportanlagen, die Schlossgebäude und der Campus der Wilhelmstraße mit den historisch ältesten und bedeutendsten Standorten der Universität. Eine Karte zeigt die Verteilung der Standorte und die Zuordnung nach Nutzung, Baujahr und Zustand (Abb. 36):

**Abb. 36: Übersichtskarte:
Verteilung der
Universitätsgebäude im
Stadtgebiet Tübingen (eigene
Darstellung)**



Bereits in den Jahren 2007-2008 wurde das Projekt *Neuordnung des Zentralcampus der Eberhardt-Karls-Universität Tübingen*¹⁹ als Architektenwettbewerb ausgeschrieben, da die gewachsene bauliche Struktur der zentralen Gebäude in der Wilhelmstraße einen modernen Forschungs- und Lehrbetrieb erschwert. Der Ideenwettbewerb hatte die Vorgabe, die alte traditionelle Struktur beizubehalten und mit zeitgemäßen und fortschrittlichen Elementen zu verbinden. Der Umbau sollte eine inneruniversitäre Vernetzung verbessern, eine städtebauliche Neuordnung unter Einbeziehung landschaftsplanerischer und verkehrlicher Aspekte für den innerstädtischen Universitätsbereich beinhalten. Mit Erweiterung der Kliniken auf dem Schnarrenberg wurde das Klinikareal als Gebäudekomplex auf Halbhöhenlage und im Tal angesiedelt. Die Gebäude der Tropenklinik, Paul-Lechler-Krankenhaus, und der Ausbau des Hörsaalgebäudes auf der Morgenstelle haben die Konzentration des Pendelverkehrs auf die Wanne verstärkt. Gemeinsam mit der Stadt wurde ein Entwicklungskonzept erarbeitet, das die Verkehrsstruktur und die Energieversorgung weiterentwickelt.

Die Energieversorgung der landeseigenen Gebäude wird über zwei Fernheizkraftwerke gedeckt. Aufgeteilt ist die Wärmeversorgung auf die Gebäude im Tal, die ein Fernheizkraftwerk (FKW I) über das Fernwärmenetz der Stadtwerke Tübingen mit Wärme aus Gas versorgt. Die Gebäude in Halbhöhenlage und auf der Wanne werden durch das neuere Blockheizkraftwerk (FKW II) durch Wärme aus Holzhackschnitzel gespeist. Photovoltaikanlagen befinden sich auf dem auf dem Klinikparkhaus CRONA, die von einer Bürgergenossenschaft angemietet ist. Weitere Anlagen zur Gewinnung von Solarenergie durch Photovoltaik

¹⁹ Projekt des Landes Baden-Württembergs vertreten durch Vermögen und Bau Baden-Württemberg, Amt Tübingen

sind im Bau und in Planung (VuB BW 2022). Laut Pressemitteilung (UNI 2016) flossen bis ins Jahr 2021 insgesamt 115 Mio. Euro in die Umgestaltung des Talcampus der Universität Tübingen und weitere 50 Mio. Euro sollen bis 2030 in Sanierungen fließen. Während vor dem Klimaschutzgesetz 2021 eine festgelegte Sanierungsrate von 1 % jährlich für diese Maßnahmen zur Verfügung stand, hat sich der finanzielle Rahmen seither ausgedehnt und kann flexibler verteilt werden (VuB TÜ 2022).

Neben der Neugestaltung des Campusareals fand auch eine inneruniversitäre Umstrukturierung statt. Im Rahmen des Planes *Campus 2020, Vision Map - Meilensteine für die Zukunft* strebte die Universität Tübingen bis 2020 eine klare Profilierung als nationale und weltweite TOP-Forschungseinrichtung unter den international führenden Universitäten an. Im Rahmen der Exzellenzinitiative hat die Universität neue Strukturen in den Bereichen Forschung, Lehre und Organisation festgelegt. Für die Erschließung von Ressourcen gehören die Nutzung der Landesmittel und Bundeszuschüsse, die projektbezogenen Drittmittel und deren Zufluss zu steigern, um neue Forschungsfelder zu erschließen (UNI TÜ 2008²⁰).

Für Krankenhäuser und Kliniken bestehen unterschiedliche Energieversorgungsmodelle, die mitunter andere finanzielle und verwaltungstechnische Strukturen für das Universitätsklinikum Tübingen zeigen. Für das technische Gebäude- und Energiemanagement des Klinikums ist das Technische Betriebsamt (tba) zuständig. Das tba ist als ein Betriebsführungsmodell eingerichtet, zu der Anlagenführung, Organisation und Verwaltungsaufgaben gehören. Als eine Form von Finanzierungsmodell gilt das Energiecontracting, das durch Übernahme von anlagenbezogenen Investitions- und Planungsaufgaben eine Kombination von Eigen- und Fremdbezug darstellt (Dienstleistungskonzepte). Wenn das Energieversorgungsunternehmen die Lieferung von Energie bereitstellt, wird Strom und Wärme nach festgelegten Preisen und weiteren Vertragsbedingungen, fremd bezogen.

In Krankenhäusern und Kliniken nimmt der Stromanteil einen hohen Stellenwert ein, da er am Gesamtenergieverbrauch durchschnittlich 20 - 30 % ausmacht und bei steigenden Stromkosten ca. 50 % der Gesamtenergiekosten einnehmen. Die Reduzierung des Stromverbrauchs kann Kosten stark reduzieren. Die Ermittlung aller Kostensenkungsmöglichkeiten inklusive der vertraglichen Strombezugskonditionen gehört zu optimierten Energiemanagementsystemen wie Nutzersensibilisierung, Aufklärungen und Motivationsstrategien zum energiesparenden Verhalten. Die zentralen Maßnahmen stellt die technische Anlagenkonfiguration dar. Die Fragen zur Sanierung werden im Konzept für die Sanierung landeseigener Gebäude festgelegt (VDEW 2007, WEBER 2012).

Auch für die Krankenhäuser und Kliniken wurde die Ausstellung von Energieausweisen zur Pflicht. Ebenso wurden Fördermöglichkeiten für die Umsetzung notwendiger Energieoptimierungsmaßnahmen z.B. durch den Einsatz von erneuerbaren Energien erlassen. Allgemein gilt für Krankenhäuser und Kliniken, dass Energiesparmaßnahmen mit den Zielsetzungen der Wirtschaftlichkeit abzuwägen sind und der Umweltschutz mit den Zielen des Gesundheitsmanagements abzustimmen ist. Dies sollen folgende Zahlen verdeutlichen: Die Gesamtkosten der Deutschen Krankenhäuser lagen im Jahr 2007 bei insgesamt 69,2 Mrd. € ein Drittel der Gesamtkosten waren Sachkosten, von denen wiederum 7 % auf die Bereitstellung von Energie und Wasser fielen (STABA 2018, STABA 2022). Die durchschnittlichen Kosten pro Krankenhaus beliefen sich somit auf ca. 800.000 € pro Jahr. Im Fall des Universitätsklinikums Tübingen, das aus einem Klinikums- und Krankenhaus-

²⁰ (Uni TÜ 2008): *Campus 2020, Vision Map - Meilensteine für die Zukunft*, Der Rektor. Poster. Universität Tübingen, 2008.

Komplex besteht, beliefen sich die Energie- und Wasserkosten auf rund 15 Mio. € im Jahr 2011 (TIPPKÖTTER 2009, tba 2015).

5.1.1. Energie- und Umweltmanagement der Universität Tübingen

Mit Inkrafttreten der Energie- und Umweltleitlinie 2010 orientierte sich das Energiemanagement verstärkt an einem nachhaltigen Ressourcenverbrauch. Am Beispiel der Universität Tübingen sind in den letzten Jahren weitere automatische Verbrauchszähler installiert worden, sodass ca. 10 % der Verbrauchszähler automatisch erfasst werden können. Überwiegend manuelle Ablesungen erfordern einen hohen Personaleinsatz und werden nicht selten durch Schätzungen mit den zuständigen Stadtwerken abgerechnet (VuB 2022). Landesweit sind bereits 60 % der universitären Standorte und den Ministerien mit automatisierter Verbrauchserfassung ausgestattet, die die Voraussetzung zur Kontrolle der Klimaschutzziele und Grundlage für den Monitoring Bericht bilden (MUK BW 2016, MUK BW 2017a, MUK BW 2017, MUK BW 2017c).

Im Jahr 2010 wurde das Energiemanagementsystem der UKT Energie Gesellschaft mbH (UEG) nach DIN EN 16001 durch GUTcert zertifiziert. Damit wird gewährleistet, dass die Prozesse des Energiemanagementsystems aufeinander abgestimmt und wirksam sind. Um die Verbräuche der Anlagen und Gebäude zu überwachen und dadurch Schwachstellen oder unnötigen Stromverbrauch zu vermeiden, sind kontinuierliche Anpassungen an neue technische Entwicklungen besonders wichtig. Die Software Ennovatis erfasst und analysiert Datenmengen verschiedener Datenquellen. Im Bereich der Energiedienstleistungen werden neue Möglichkeiten des Energiecontractings erprobt. Bereits bestehende Zertifizierungen des Energie- und Gebäudemanagement sowie des Umweltmanagements der Universität erfordern interne und externe Audits. Für zertifizierte Einrichtungen und Unternehmen ergehen steuerliche Vorteile.

Die Studierendeninitiative „Greening the University“, startete eine durch Studenten initiierte Bewegung mit innovativen Beiträgen zu aktivem Klimaschutz. Diese Initiative bereitete auch den Weg für die Zertifizierung der Universität nach EMAS (Eco-Management and Audit Scheme) vor. Im September 2011 wurde die Zertifizierung nach EMAS der Universität Tübingen als erster Universität in Baden-Württemberg im Jahr 2011 verliehen. Das Energiemanagement startete in Kooperation mit der Umweltkoordination der Universität eine Kampagne zur Sensibilisierung der Mitarbeiter zum Thema „Kluge Köpfe für den Klimaschutz“. Die Energieleitlinie des UKT und die Umweltrichtlinie der Universität beinhalten weitere Ziele zu einem umweltbewussten Energiemanagement. Das Energie- und Gebäudemanagement der Universität und des Universitätsklinikums wurde nach GutZert zertifiziert (Greening the University 2009, UNI TÜ 2016).

Mit dem Projekt *Roadmap* begann der Weg zur Umweltzertifizierung, indem eine Umweltleitlinie festgelegt wurde. Aufgabe der Umweltkoordination ist es ein ganzheitliches Konzept zu etablieren, indem die Sensibilisierung der Nutzer im Umgang mit Ressourcen wie Wasser und Papiereinsparmaßnahmen, Verhaltenskodex, Bewusstmachung der Auswirkungen und Kosten Dritter, Ernährungsalternativen, Müllvermeidung, in Form einer Energiespar- und Klimaschutzkampagne erstellt. Bereits seit November 2010 machte die Kampagne auf den hohen Energieverbrauch und die damit zusammenhängenden Energiekosten der Universität aufmerksam, die in den Jahren 2007-2015 durch die gestiegenen Energiepreise ungleich zum Nutzen anstiegen. Im Mittelpunkt der Kampagne standen zunächst das Verbraucherverhalten und die Möglichkeit, Energie zu sparen. Universitätsintern bildete sich das Umweltmanagement immer weiter aus (VuB BW 2008, Uni Tü 2008, Uni TÜ 2016).

Im Rahmen des umfassenden *Bologna Prozesses* zur Umgestaltung der Studiengänge, wurden neue Anforderungen an aktuelle Bildungsinhalte und alternative Bildungsangebote aufgenommen. Im Bericht Nachhaltigkeit ist das Studium Oekologikums²¹ entstanden. Für die Universität Tübingen stand die Umsetzung eines Studium Oekologikums im Vordergrund und wurde binnen zwei Jahren von einer Vorlesungsreihe zu einem studienbegleitenden Studiengang aufgebaut. Ziel ist die Einführung eines zertifizierten neuen Studienganges mit dem Schwerpunkt „Nachhaltigkeit in den Wissenschaften“. Hierfür wurde eine überregionale Vernetzung der Universität mit der umliegenden Region angestrebt z.B. dem Biosphärengebiet Schwäbische Alb, der Stadt Tübingen, der Stadtwerke Tübingen, den Regionalverband Neckar-Alb, Naturschutzverbunde, Umweltzentren. Auf kommunaler Ebene sind die Landratsämter und Regierungspräsidien eingebunden und auf Landesebene die Ministerien. Weiter sind das Ethiknetzwerk Baden-Württemberg und der Dekade für Bildung für nachhaltige Entwicklung beteiligt, die Erfahrungen in inter- und Transdisziplinarität einbringen.

Parallel etablierten sich bereits neue Forschungsschwerpunkte und innovative Forschungsprojekte mit dem Ziel Nachhaltigkeit durch angewandte Forschung in der Lehre zu implementieren. Ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zu einer nachhaltigen Universität symbolisiert die Gründung des Beirats für nachhaltige Entwicklung, dessen Aufgabe es ist, eine umfassende Nachhaltigkeitsstrategie als Gesamtstrategie für die Universität Tübingen zu entwickeln und umzusetzen. Eine internationale Vernetzung geschah durch die Gründungsmitgliedschaft der Universität Tübingen im MATARIKI-Netzwerk, in dem Universitäten studentische Initiativen fördern und zu den nachhaltigen Aktionen motivieren.

Diese war bereits Teil des Bewerbungsverfahrens für die Ernennung zur Exzellenzinitiative, die erstmals im Jahr 2016 an die Universität Tübingen vergeben wurde. Ebenfalls angestoßen durch das Strategie Forum „Chancen und Möglichkeiten der Fernerkundung für die öffentlichen Verwaltungen“ des Bundesministeriums des Innern (BMI) und des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) im Oktober 2011 wurde die vorliegende Arbeit konzipiert. Darin wurde die Gebäudebestandsaufnahme, eine energetische Gebäudebewertung sowie eine Potenzialermittlung für alternative Energieformen zu den bisher genutzten konventionellen Energieressourcen zu erfassen (MANTON, 2012).

→ Die Neugestaltung des Zentralcampus im Zentrum Tübingen sowie einige Neubauten für neue Wissenschaftszentren und weitere Klinikumsgebäude sind in der Geodatengrundlage von 2015 dieser Arbeit noch nicht enthalten.

²¹Greening the University (Hrsg.)(2009), Perspektiven für eine nachhaltige Hochschule, Studierenden Initiative Universität Tübingen, Oekom Verlag 2009.

5.1.2. Darstellung des Energieverbrauchs der Universität Tübingen

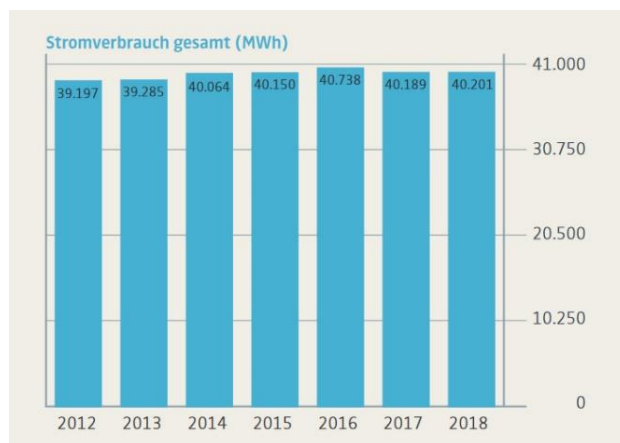
Wärmeverbrauch der Universität Tübingen



In den Jahren 2016 und 2017 sank der witterungsbereinigte Gesamtwärmeverbrauch um ein halbes Prozent, während er im Folgejahr 2018 wieder um ca. 4,5 % anstieg. Im Zeitraum von 2013 bis 2018 stieg der Gesamtwärmeverbrauch insgesamt um 7,2 % an.

Abb. 37: Gesamtwärmeverbrauch (UNI TÜ 2019)

Stromverbrauch der Universität Tübingen



Der Stromverbrauch sank leicht von 2016 auf 2017 um 1,4 %. In den Folgejahren blieb der Stromverbrauch fast unverändert bis 2018 (- 0,03 %). Im Zeitraum von 2013 - 2018 stieg der Stromverbrauch insgesamt um 2,3 % an. Dies ist laut Umweltbericht 2019 teils auf wirksame Energiesparmaßnahmen zurückzuführen (LED 1.800 MWh), teils auf Nutzungsänderungen in Gebäuden (UNI TÜ 2019).

Abb. 38: Stromverbrauch (UNI TÜ 2019)

Anteil erneuerbarer Energien an Wärme und Strom

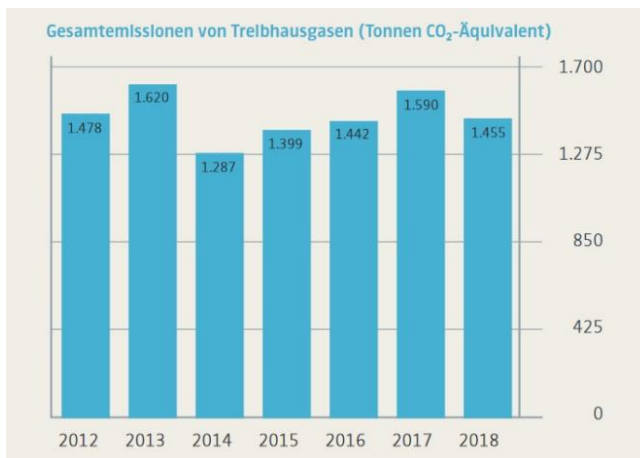


Der Anteil der erneuerbaren Energien ist laut Umweltbericht 2019 erheblich in den Jahren 2015 bis 2015 gestiegen. Durch den Anstieg des Energieverbrauchs in den Jahren 2015 bis 2018 ist der prozentuale Anteil der Erneuerbaren Energien gesunken, da der Ausbau weiterer Anlagen stockte.

Abb. 39: Anteil erneuerbarer Energien an Wärme und Strom (in %) (UNI TÜ 2019)

5.1.3. Darstellung der CO₂-Emissionen von Universität und Klinikum

Gesamtemissionen von Treibhausgasen



Die Gesamtemissionen von Treibhausgasen stiegen von 2016 auf 2017 um 10,2% und sanken von 2017 auf 2018 um 8,5 %. In den Jahren 2013 bis 2018 ist eine Abnahme von 10,2 % zu verzeichnen²².

Abb. 40: Gesamtemissionen von Treibhausgas (t CO₂-Äquivalent) (UNI TÜ 2019)

Aktuell werden die Universitätsgebäude zu ca. fast 88 % mit Fernwärme, 9 % Erdgas und 2 % Heizöl beheizt ²³. Im Gegensatz zu den früheren Umwelterklärungen erfolgte die Witterungsbereinigung seit 2018 mit den Klimafaktoren des Deutschen Wetterdienstes. Vergleichsweise sind die ausgewiesenen CO₂-Emissionen des Energieverbrauchs von 2018 (Umweltbericht 2019) und die nach GEMIS 4.93 zu kompensierenden CO₂-Emissionen aufgeführt (s. Abb.41). Die aus dem Energieverbrauch berechneten CO₂-Emissionen nach GEMIS (4.93. 2014/2018) weisen für Universität und Klinikum insgesamt 17,7 Mt CO₂ aus, die nach der Zielvorgabe des Klimaschutzgesetzes 2021 bis 2030 zu reduzieren, senken oder zu kompensieren sind (s. Tab.9).

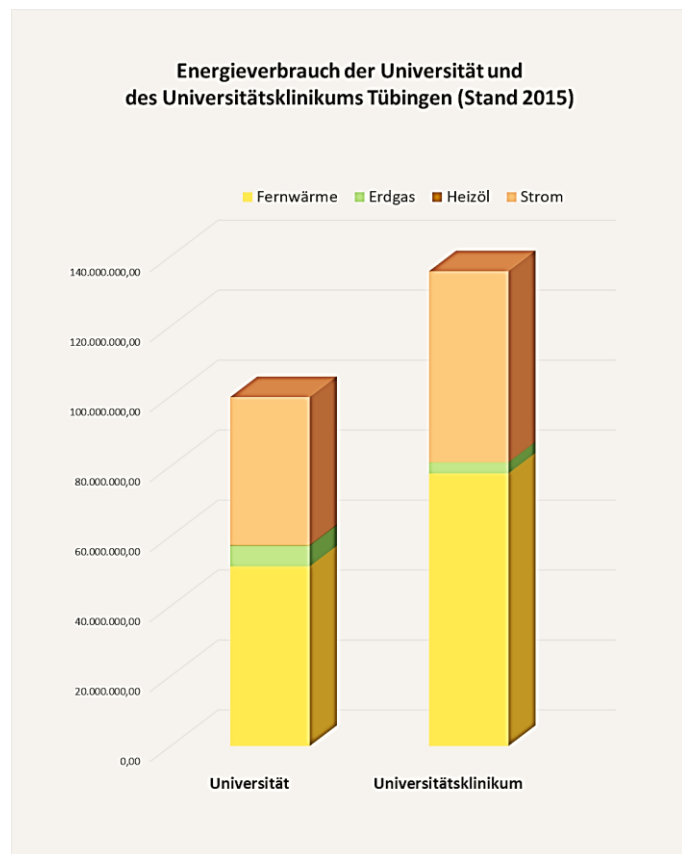


Abb. 41: Energieverbrauch der Universität und des Universitätsklinikums Tübingen (Stand 2015)

²² Diese Zahlen hängen mit dem zunehmenden Bezug von Ökostrom des Landes Baden-Württemberg zusammen und sind beeinflusst durch die 2014 gesenkten GEMIS-CO₂ Äquivalente, die für die Berechnung herangezogen wurden.

²³ Die aktuellen Wärmeverbrauchszahlen stammen aus dem Energiebericht der Universität Tübingen (2019) und sind witterungsbereinigt.

Tab. 9: Aufstellung der zu kompensierenden CO₂-Emissionen (nach Energieverbrauch 2015) bis 2030 (eigene Darstellung berechnet mit GEMIS 4.93. 2014/2018)

Strom- und Wärmeverbrauch 2015** Energieverbrauch in kWh/a	GWh/a	CO ₂ -Emissionen in t CO ₂ (nach GEMIS 4.93. 2014/2018)
Fernwärme	129,28	11.764,73
Erdgas	9,13	2.028,56
Heizöl	0,14	41,90
Wärmeverbrauch Gesamt	138,56	13.835,21
Ökostrom	96,90	3,87
Gesamtemissionen (zu kompensieren)	-	17,71 Mt CO₂

5.2. Lokale Rahmenbedingungen für erneuerbare Energien

Nachfolgend werden die geologischen und klimatischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes vorgestellt soweit sie für die Betrachtung des erneuerbaren Energiepotenzials von Bedeutung sind. Hierzu gehört die Erläuterung des Schichtenverlaufs im Untergrund und den damit verbundenen Risiken bei einer geothermischen Nutzung. Tübingens niedrigster Geländepunkt liegt auf 310 m ü. NN am Zusammenfluss von Ammer und Neckar. Der höchste Punkt liegt bei ca. 510 m ü. NN auf den Höhenlagen des Schönbuchs. Anhand des veröffentlichten Kartenmaterials des Landratsamtes in Tübingen sind Schutzgebiete, Verbots- und Risikozonen zu erkennen. Durch das Untersuchungsgebiet fließen vier größere Gewässer. Der Goldersbach entwässert den Naturpark Schönbuch und mündet im Stadtteil Lustnau in die Ammer. Diese fließt von West nach Ost durch die Altstadt und mündet ebenfalls bei Lustnau in den Neckar. Die Steinlach kommt von Süden und erreicht im Stadtteil Derendingen den Vorfluter Neckar. Die Topographie der Stadt und der oberflächennahe Untergrund werden vor allem durch das Neckar- und Ammertal geprägt, was auch einen messbaren Einfluss auf die geothermischen und solaren Potenzialberechnungen hat.

5.2.1. Geologische Voraussetzungen

Entgegen den üblichen geologischen Darstellungen, die den Schichtenverlauf von unten nach oben darstellen, ist es unter dem Gesichtspunkt einer geothermischen Eignung sinnvoller, die Schichten in der Reihenfolge darzustellen, in der sie bei Bohrungen von oben nach unten erreicht werden (Abb. 42). Die lithostratigraphische Nomenklatur orientiert sich an der Arbeit von FALKE 1975, HAHN & SCHÄDEL 1973, STÖBER 2007, GEYER & GWINNER (2010), BGR 2010, BGR 2016, MUK BW 2018,)

Höhe in m ü. N.N.	Lithostratigraphische Gruppe		Gesteinstyp	Mächtigkeit	Tiefe (Pix D)	Tiefe Σ in m
490	Jura	Lias alpha	Ton- /Sandstein	0-7 m	+ 1	
480	Oberer Keuper	Rhätsandstein	Sandstein	10-15 m	+ 10	
450	Mittlerer Keuper	Knollenmergel	Tonstein	30 m	+ 30	40
400		Stubensandstein	Sandstein	50-60 m	+ 50	90
385		Bunte Mergel	Steinmergelbänke	15-18 m	+ 15	105
383			Kieselsandstein Ton, wenig Sandstein	2m	+ 2	107
368			Berggips und Rote Wand	14-18 m	+ 14	121
358		Schilfsandstein	Sandstein	30 m	+ 10	131
328			Gipskeuper	Ton, Gips, Anhydrit, Anhydritschicht	30 m	+30
260			Sulfathaltiges Gestein	60 m	+60	220
245	Unterer Keuper	Lettenkeuper	Artesisch gespanntes Grundwasser	15 m	+15	235
243			Grenzbenebed-Horizont	2 m	+ 2	237
163	Oberer Muschelkalk		Kalkstein	80-85 m	+ 80	320
140		Grundwasserleiter 1				
134		Haßmersheimer Schichten	Tonschicht- Grenzschicht	6-7 m	+ 6	326
		Grundwasserleiter 2				
ca. 80	Mittlerer Muschelkalk	Karst- Grundwasser möglich		70-100 m	+ 70	ca. 400

Abb. 42: Vereinfachte Schichtenabfolge im Stadtgebiet Tübingen (digital übertragen nach Hahn & Schädel, 1973).

Die höchsten Wohngebiete im Tübinger Norden (Waldhäuser Ost) liegen auf den Schichten des Unteren Schwarzen Jura (Lias α). Als anstehenden Gesteine sind die Pylonoten- und Angulatenschichten unter geringmächtiger Lössbedeckung anzutreffen. Es handelt sich dabei um blättrige Tonmergel und plattigen Kalksandsteine. Wegen starker Zerklüftung sind diese Gesteine wasserführend, weshalb es an der Schichtgrenze zum liegenden Knollenmergel verbreitet zu Quellaustritten kommt. Die Universitätsgebäude liegen in der Talaue der Ammer (Campus Wilhelmstraße) und in der Verebnung des Stubensandsteins (Campus Morgenstelle und Klinikum Schnarrenberg). Dazwischen liegen die *Kliniken Tal* vorwiegend auf *Buntem Mergel*, Schilfsandstein und Gipskeuper (HAHN & SCHÄDEL 1973, LGRB 2013).

Unter dem Lias folgt die petrographisch sehr vielfältige Keuperformation als jüngste Epoche der Germanischen Trias. Nur vereinzelt ist auf einer Höhe von 430 - 450 m ü. NN die Schichtfolge des Rhätsandsteins (Exter-Formation) im Stadtgebiet anzutreffen. Darunter folgt der Knollenmergel (Trossingen-Formation) mit bis ca. 30 Meter Mächtigkeit, der wegen quellfähiger Tonminerale zu Rutschungen neigt und als baulich kritischer Untergrund gilt. Darunter folgen weitere Formationen des Mittleren Keupers, die im Stadtgebiet vorherrschen.

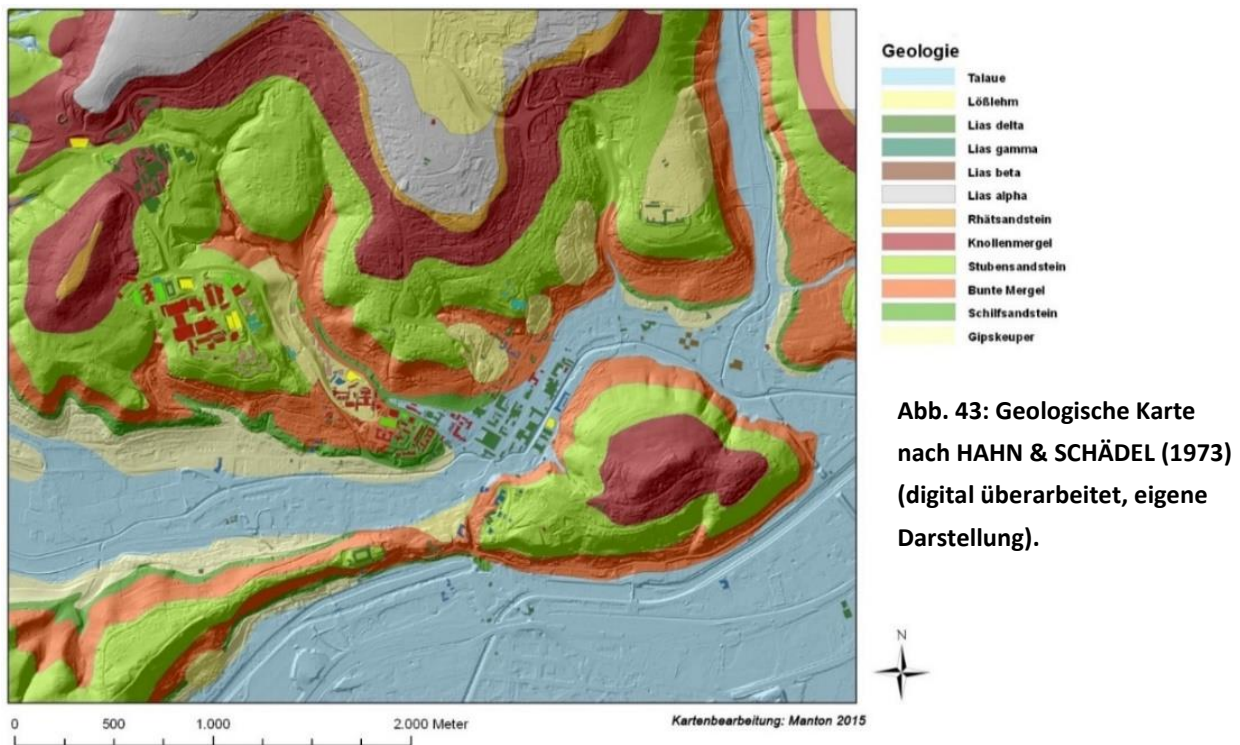


Abb. 43: Geologische Karte nach HAHN & SCHÄDEL (1973) (digital überarbeitet, eigene Darstellung).

Stubensandstein (Löwenstein-Formation)

Der Stubensandstein dominiert die Talhänge zwischen 380 und 440 m ü. NN und bildet markante Verebnungen auf der Wanne und der Morgenstelle, wo sich das *Klinikum am Schnarrenberg* befindet. Im Raum Tübingen erreicht der Stubensandstein eine Gesamtmächtigkeit der Abfolge von 50-60 Metern und besteht aus bis zu vier mächtigen Sandsteinbänken, die von Tonmergelschichten unterbrochen werden. Die grobkörnigen Sandsteine erscheinen in dicken Bänken und sind im Nordosten der Stadt mit 45 m deutlich mächtiger als im Südwesten (ca. 30 m). Durch seine Widerständigkeit und Mächtigkeit bildet der Stubensandstein die markanteste Schichtstufe des Keuperberglandes bei Tübingen.

Bunte Mergel (Mainhardt-, Hassberge- und Steigerwaldformation)

Im Liegenden folgen die Bunten Mergel. Sie bestehen im oberen Teil aus grünen, roten und violetten Mergeln, die von kalkigen Steinmergelbänken durchzogen werden (Mainhardt-Formation). Darunter folgt der bis zu 2 Meter mächtige Kieselsandstein (Hassberge-Formation), der die Grenze zu den Unteren Bunten Mergeln (Steigerwald-Formation) markiert. Insgesamt erreichen die Bunten Mergel im Raum Tübingen eine Mächtigkeit von 25 - 35 m. Sie sind überwiegend *Grundwassergeringleiter* und neigen stellenweise zu Rutschungen. Diese Keuperformation steht im Stadtgebiet überwiegend an den mittleren bis unteren Hanglagen an.

Schilfsandstein (Stuttgart-Formation)

Der geringmächtige Schilfsandstein (meist < 10 Meter) tritt im Stadtgebiet selten in Erscheinung. Er lagert unter den *Bunten Mergeln* und ist häufig in seiner Tonmergelreichen *Normalfazies* ausgebildet. Die sogenannte *Flutfazies* besteht aus einem widerständigen, feinkörnigen Sandstein, der jedoch in Tübingen eher selten vorkommt, beispielweise im Bereich der *Kliniken Tal* nördlich der Altstadt.

Gipskeuper (Grabfeld-Formation)

Die bis zu 100 Meter mächtige Abfolge graugrüner bis rötlicher Ton- und Mergelgesteine weist vor allem im unteren und mittleren Bereich Gips- oder Anhydrit führende Schichten auf, teils linsenförmig ausgebildet. Der Gipskeuper streicht an den Unter- bis Mittelhängen bis in eine Höhe von ca. 350 m ü. NN im westlichen Teil der Stadt aus. Durch Subrosion des sulfathaltigen Gesteins können im Ausstrichbereich der Schichten Baugrundprobleme auftreten. Wegen seiner Neigung zu unkontrollierten Quellprozessen und bereits mehrerer Schadereignisse in Baden-Württemberg darf der Gipskeuper bei geothermischen Bohrungen nur unter strengen Auflagen durchteuft werden.

Unterer Keuper (Erfurt-Formation)

Der Untere Keuper erreicht in Tübingen Mächtigkeiten bis 18 Meter. Er streicht im Stadtgebiet nicht an der Oberfläche aus. Petrographisch besteht die älteste Keuperformation vorwiegend aus feinkörnigen Ton- und Mergelschichten. Aufgrund tonreicher und kohligter Lagen mit versteinerten Pflanzenresten wurde der *Untere Keuper* früher als Lettenkeuper oder Lettenkohle bezeichnet. Am Übergang zum marin abgelagerten Oberen Muschelkalk bildet die markante *Grenzbonebed-Schicht* einen wichtigen Leithorizont.

Oberer Muschelkalk – Grundwasserspeicher und Karst-Grundwasser

Der Obere Muschelkalk beginnt im Raum Tübingen mit dem Trigonodusdolomit der Rottweil-Formation. Darunter folgen die plattigen Kalksteine der Nodosusschichten (Meißner-Formation) sowie die Trochitenkalke, die von den tonigen Haßmersheimer Schichten unterbrochen werden. Insgesamt erreicht der Obere Muschelkalk im Raum Tübingen eine Mächtigkeit von 70 bis 85 Metern. Diese Formation streicht im Stadtgebiet nicht an der Oberfläche aus. Erst im Westen des Landkreises treten die Dolomite und Kalke des Oberen Muschelkalks mit ihren Karstformen – vorwiegend Trockentäler und Dolinen – in Erscheinung. Die klüftigen Kalk- und Dolomitgesteine des Muschelkalks sind abhängig vom Verkarstungsgrad als ergiebige Karstgrundwasserleiter bzw. als Kluftgrundwasserleiter zu charakterisieren (RICHTER 1975, UFRECHT 2006, UFRECHT et al 2015).

Eine wichtige hydrologische Grenze bilden die Haßmersheimer Schichten, deren Tiefenlage aus den Bohrprofilen der Landesanstalt für Geologie und Bergbau (LGRB) hervorgehen. Die notwendige Trenn- und Schutzwirkung dieser Schichten wird gewährleistet indem Bohrungen eine Deckschicht von 25 m über dem Oberen Muschelkalk einhalten müssen. Tiefer liegende Schichten des Mittleren und Unteren Muschelkalkes können an dieser Stelle unberücksichtigt bleiben, da geothermische Bohrungen in Tübingen, die eine Tiefe von ca. 300 m übersteigen, mit großen Risiken und besonderen baulichen Sonderauflagen mit immensen Zusatzkosten verbunden sind (LGRB 2013).

5.2.2. Einschränkende Faktoren für Erdwärmegewinnung

Die geothermische Nutzung des Untergrundes im Arbeitsgebiet Tübingen hängt von den hydrologischen und geologischen Gegebenheiten ab. Neben Wasserschutzgebieten werden auch hydrologische und geologische Risiko- und Verbotszonen ausgewiesen (LUBW 2022a, s. Abb.43):

- Ausgewiesene Wasserschutzgebiete, in denen durch Erdwärmesonden die Gefahr der Grundwasserverunreinigung besteht. Diese befinden sich in Tübingen im Bereich der Neckaraue.
- Mögliches Vorkommen von Artesern. Die unter hohem Druck stehenden Grundwasserspeicher können bei Bohrungen Wasser in quelfähige Gesteinsschichten aufsteigen lassen z.B Gipskeuper.
- Bereiche mit Austritt von Kohlendioxid, teilweise Hinweis auf das Vorkommen einer natürlichen Mineralwasserquelle.

Die Berechnung von *Brunnenspezifischen Einflüssen* oder der Zusammensetzung des Grundwassers mit möglichen Einflüssen auf die technischen Anlagen, sowie die Nutzung von Aquiferen (Grundwasserspeichern) wird nicht berücksichtigt. Diese Berechnungen sind im Rahmen einer Genehmigung durch einen geologischen und Hydrologischen Experten zu erbringen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen zur Errichtung geothermischer Anlagen sind zu finden unter (LGRB 2013)²⁴:

- Wasserschutzgesetz / Wasserhaushaltsgesetz (WHG)
- Richtlinie W101 für Trinkwasserschutzgebiete des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs e.V. (DVGW).
- Hydrogeologischen Kriterien zur Anlage von Erdwärmesonden in Baden-Württemberg
- Bebauungsplan existiert, ist die bauplanungsrechtliche Zulassung nach § 34 (Innenbereich), § 35 (Außenbereich) BauGB.

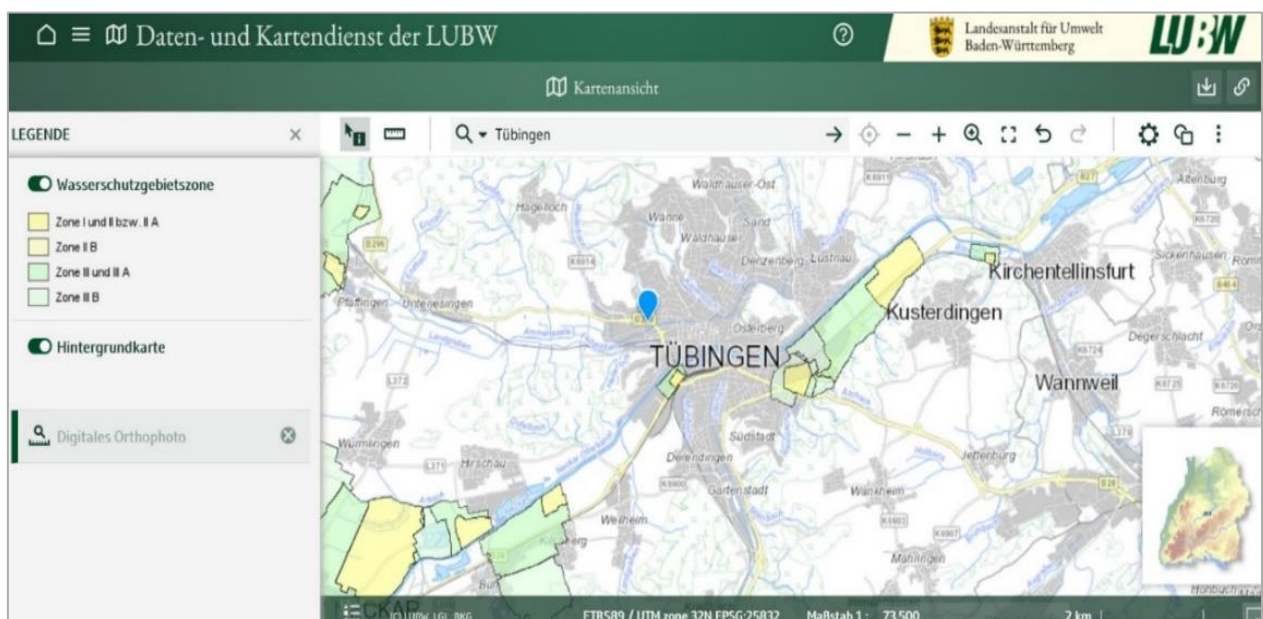


Abb. 44: Wasserschutzgebiete auf der Gemarkung Gemeinde und Landkreis Tübingen (LUBW 2022a)

Weiterführende Berechnungen werden für die Bestimmung hydraulischer Eigenschaften wie Durchlässigkeit (Permeabilität), Profildurchlässigkeit (Transmissibilität) und die Hohlraumanteile empfohlen. Die Untersuchungsmethoden für diese Parameter finden überwiegend an Bohrprofilen statt, die im Labor untersucht werden. Hier wurden Richtwerte der VDI-Richtlinien übernommen (VDI 2010).

²⁴ Die Richtlinien für Vorsichtsmaßnahmen zu Geothermie wurden in Manton (2011), Abschlussbericht Vorarbeiten unveröffentlicht, Manton et al. (2012), Böding (2015) unveröffentlicht und Leicht (2015) unveröffentlicht; aufgeführt.

Wasserschutzgebiete

Mit der Ausweisung von Wasserschutzgebieten werden konkurrierende Nutzungsansprüche und Vorhaben im Bauleit- und Flächennutzungsplanung geregelt. Die Ziele eines Wasserschutzgebietes wurden 1995 mit der „Richtlinie W101 für Trinkwasserschutzgebiete des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs e.V. (DVGW)“ novelliert. Die unteren Verwaltungsbehörden und die Regierungspräsidien sind für die Untersuchung geeigneter Wasserspeicher für die Trinkwassergewinnung aus Grundwasser und aus Heilquellen verantwortlich. Für Heilquellenschutzgebiete gelten die Bestimmungen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) aus dem Jahr 1998 (LGRB 2015). Ebenfalls ist die Landwirtschaft durch die Bestimmungen der Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung (SchALVO) und durch den Bau von Erdwärmesonden oder die Bearbeitung von Altlasten betroffen.

Für die Gebiete, die nicht als Wasserschutzgebiete ausgewiesen sind, gelten die Kriterien der *Hydrogeologischen Übersichtskarte 1:500.000* (MUK BW 2004:24, MUK BW 2008/2), das Baden-Württemberg in verschiedene Klassen einteilt. Je nach Gesteinsuntergrund, Porengröße oder der Größe des Einzugsgebietes herrschen spezifische Fließgeschwindigkeiten im Grundwasser vor, wodurch sich Verunreinigungen unterschiedlich rasch verbreiten können. Aus diesem Grund regeln die Kriterien der Klassen A, B1, B2, B3, C, D das Verunreinigungsrisiko durch Erdwärmebohrungen oder verbieten diese gegebenenfalls. Die Klassifizierung des Untergrundes von Tübingen wurde vom zuständigen Landratsamt in die vier Hauptklassen unterteilt.

In günstigen Gebieten (Klasse A) dürfen geothermische Bohrungen bis zu einer bestimmten Tiefe (z.B. bis 100 m, bis 200 m) durchgeführt werden. Die Klassen B3, C und D bedürfen einer Einzelfallprüfung, einer Sondergenehmigung oder sind Verbots- und Risikogebiete. Da diese nur an den Randschollen des Oberrheingrabens und an ausgeprägten Verwerfungen vorkommen, trifft dies für Tübingen nicht zu. Im Bereich der Tübinger Neckaraue sind größere Wasserschutzgebiete ausgewiesen. Innerhalb rechtskräftiger Wasserschutzgebiete besteht eine Drei-Zonen Einteilung, nach der in den Zonen 1 und 2 alle Erdwärmennutzungen ausgeschlossen werden. Entweder ist die Fließgeschwindigkeit des Wassers zu hoch oder eine Verunreinigung könnte schwerwiegende Folgen für das Einzugsgebiet der Brunnen haben. Die Zonen 3 a und b schützen Quellen und Karstgrundwasser grundsätzlich und schließen Erdwärmesonden gänzlich aus (s. Abb. 45).

Arteser und Grundwasser

Zu den Risikogebieten für das Auftreten von Artesern aus dem Muschelkalk zählen das Neckartal westlich von Tübingen, der Stadtteil Derendingen, das Ammertal zwischen Unterjesingen und Weststadt, und der weitere Verlauf des Ammertals nördlich des Österbergs. In höheren Lagen Tübingens (ab ca. 350 m ü. NN) sind Bohrungen voraussichtlich bis auf eine Tiefe von 260 m zulässig. Dies setzt voraus, dass kein sulfathaltiges Gestein auftritt und die Deckschicht über den Grundwasserleitern nicht angebohrt wird. Im Stadtgebiet bilden die Keupersandsteine und der Obere Muschelkalk die Grundwasserleiter neben den quartären Talfüllungen von Neckar- und Ammertal. Als Grundwassergering- oder auch *Grundwassernichtleiter* gelten die tonreichen Schichten des Knollenmergels und der Bunten Mergel. An der Basis des Oberen Muschelkalks bilden die Haßmersheimer Schichten einen wichtigen Grundwassernichtleiter. Sie dürfen von Bohrungen nicht tangiert werden (SASS 2009, LUBW 2022a; LRA Tü 2022).

Sulfathaltige quellfähige Gesteinsschichten

Aus bereits existierenden Bohrungen konnten Erfahrungswerte in Bezug auf den Sulfatgehalt des Gipskeupers (Grabfeld-Formation) gewonnen werden. Im Bereich der Talböden der Gipskeuper meist bereits in 10 m Tiefe ansteht, ist dort die Einhaltung der vorgeschriebenen Abstandregeln zur Deckschicht nicht möglich. Nach Angaben des Landratsamtes darf daher in diesem Bereich nicht gebohrt werden. Der obere Bereich des Gipskeupers ist partiell Grundwasser durchströmt und durch Subrosion ausgelaugt. Die beschriebene *Auslaugungsfront* kann kleinräumig stark variieren, was eine sichere Prognose erschwert, so dass riskante Schichten mit Gipshorizonten erst in größerer Tiefe zu erwarten sind (LRA Tü 2022).

Das Landratsamt prüft Anträge auf Geothermiebohrungen anhand eines prognostizierten Gipskeuperspiegels, wodurch Tiefenbeschränkungen ausgewiesen werden. Der Landkreis Tübingen wird in drei Kategorien unterteilt, von denen Tübingen die Zonen 1 und 2 aufweist.

- ➔ Zone 1 „Tiefenbohrungen nicht möglich“, da sulfathaltiges Gestein oberflächennah ansteht.
- ➔ Zone 2 sind „Tiefenbohrungen eingeschränkt möglich“, da sulfathaltiges Gestein erst im tieferen Untergrund zu erwarten ist.
- ➔ Zone 3, in der es „derzeit keine Tiefenbeschränkungen“ gibt, kann in Tübingen nicht ausgewiesen werden (ebd.).

Die gesamte Tübinger Kernstadt befindet sich in Zone 1 und unterliegt somit zusätzlichen Auflagen bei der Prüfung eines Bauvorhabens. Bohrungen sind nur mit hohen Auflagen erlaubt. Die Hanglagen befinden sich überwiegend in Zone 2 und erfordern ebenfalls zusätzliche Untersuchungen z.B. Probebohrungen. Trifft man dennoch bei einer Probebohrung auf sulfathaltiges Gestein, muss die Bohrung sofort abgebrochen werden. In diesem Fall muss das Bohrloch mit einem zwei Meter mächtigen Betonpfropfen befüllt werden, um die angebohrte Stelle ausreichend abzudichten. Das Bohrloch kann anschließend bis zur Betonbefüllung mit einer Sonde bestückt und so Erdwärme gewonnen werden. Wenn keine sulfathaltigen Gesteine angetroffen werden, kann mit Auflagen unter stetiger Kontrolle des Bohrloches tiefer gebohrt werden.

Da diese Tiefenbeschränkungen durch Diskussionen in Verbindung mit der Realisierung des neuen Bahnhofs in Stuttgart, angezweifelt wurden, bestand hier eine Prüfung der Tiefenbeschränkungen. Besonders bezüglich des Umgangs der Behörden mit dem Thema „Sulfatgesteine“ ist davon auszugehen, dass es hier mittel- und langfristig zu einer Lockerung der Tiefenbeschränkungen kommt. Deshalb sind sulfatführende Gesteine als potentielle Energie-Ressource betrachtet und das Erdwärmepotenziale bis zu den Haßmersheimer Schichten berechnet worden (LUBW 2022; LRA Tü 2022; UFRICHT 2015).

Für die Nutzung geothermischer Anlagen sind zerklüftete Untergrundverhältnisse besonders riskant. Das unterirdische Kluftsystem kann nicht detailliert kartiert werden, wodurch das Versickern von Trägerflüssigkeiten nicht vorhersehbar sind. Bohrungen müssen sofort gestoppt werden sobald ein Verlust von Bohrwasser während der Bohrung auftritt. Die Karst-Grundwasserspeicher im oberen Muschelkalk liegen in ca. 40-100 m Tiefe. Ihre Zusammensetzung ist reich an Mineralen und Salzen. Der Chemismus des Grundwassers ist für technische Belange relevant, da bestimmte Inhaltsstoffe Geräte, Abdichtungen und Schläuche beschädigen können (LRA Tü 2022; LGRB 2013; LUBW 2022a, LUWB 2022b). Nach diesen Ausführungen wird deutlich, dass das nutzbare geothermische Potenzial in Tübingen möglicherweise höher ist, als bisher angenommen. Betrachtet man das Stadtgebiet Tübingens mittels der vorangehenden Kriterien wird ersichtlich, dass lediglich die Zone II B zutreffend sind (s. Abb. 43). Daher kann einer

Erdwärmesondenbohrung bis zu einer bestimmten Tiefe aus hydrogeologischer Sicht in jedem Falle zugestimmt werden. Die Untergrundverhältnisse der Zone B1-Gebiete werden für den Bau und den Betrieb von Erdwärmesonden als hydrogeologisch günstig eingestuft, unterliegen aber aufgrund der unterschiedlichen Petrographie einer Tiefenbeschränkung von 200 m mit erforderlicher Einzelfallprüfung (Näheres unter Kap. 7.1: Auswertung der Flächen für Erdwärme).

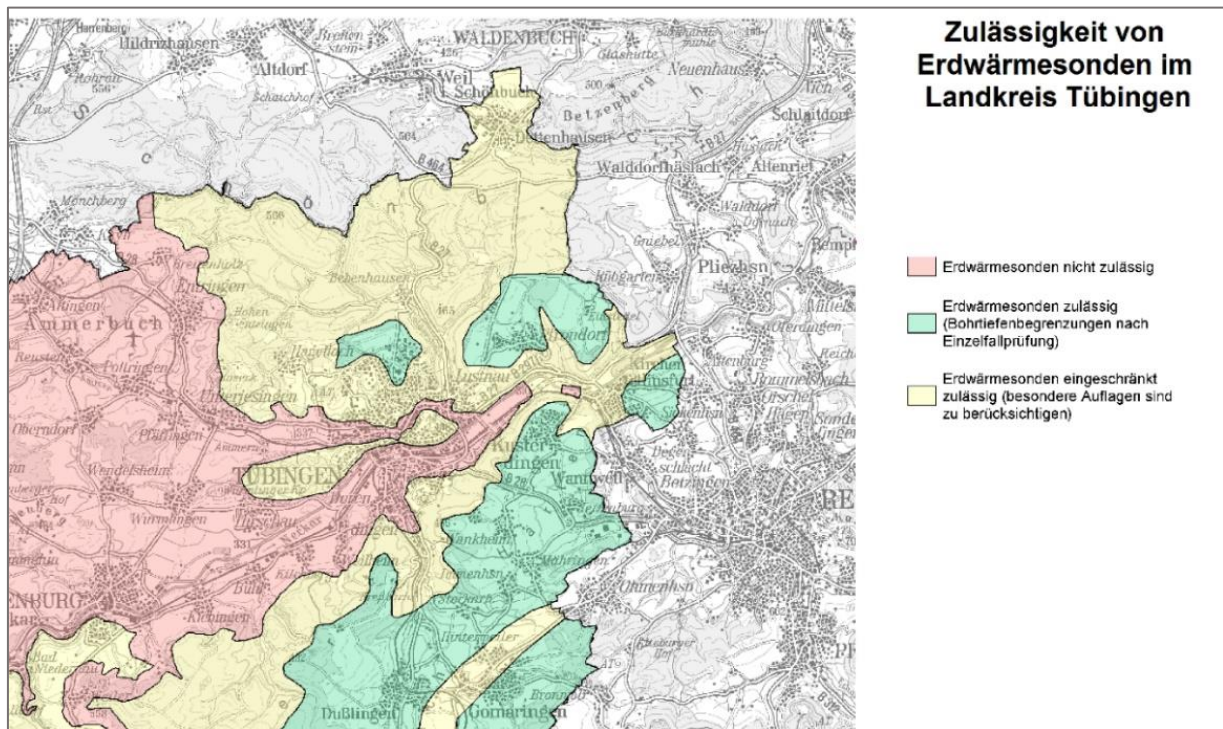


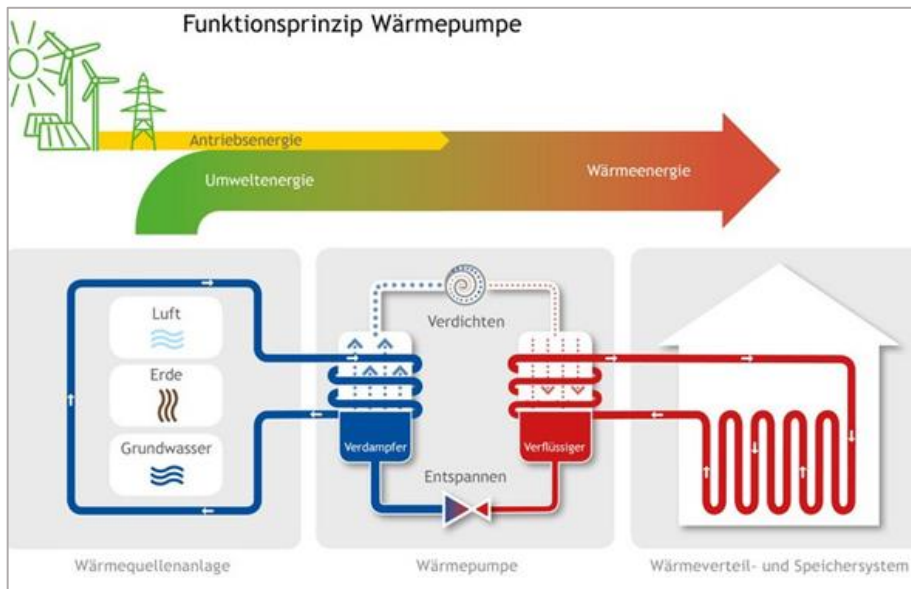
Abb. 45: Zulässigkeit von Erdwärmesonden im Landkreis Tübingen - Ausschnitt (LRA Tü 2022)

Wärmeentzug mittels Wärmepumpen

Mittels der Wärmepumpe wird dem Untergrund die Wärme entzogen und als Heizenergie zur Verfügung gestellt. Wenn die Wärmepumpe die erforderliche Wärme nicht verfügbar machen kann, bleibt das Potenzial ungenutzt. Reicht die Leistung einer Wärmepumpe bzw. der Erdwärmesonde nicht aus, werden mehrere Bohrungen auf Basis der berechneten Entzugsleistung angesetzt. Die Funktionsweise einer Wärmepumpe ist im Prinzip identisch mit einem Kühltisch. Statt im Kühltisch die Wärme nach außen zu leiten, leitet die Wärmepumpe die Wärme nach innen, indem sie dem Erdreich die Wärme entzieht. Das geschieht nach dem physikalischen Prinzip, dem „Joule-Thomson-Effekt“. So kann die Wärmepumpe für Kühlung und Heizung eingesetzt werden (s. Abb. 46). Die Anlage besteht aus drei Teilen: 1) Wärmequellenanlage 2) Erdwärmesonde 3) Wärmepumpe und dem Wärmeverteils- und Speichersystem (MUK BW 2008/1, MUK BW 2008/2, MUK BW 2009/2, MUK BW 2009/3, MUK BW 2010) (Näheres zur Anlagenkonfiguration in dieser Arbeit unter Kap. 6.3).

Mithilfe der Flüssigkeit wird die Wärme aus dem Erdreich entzogen und zur Wärmepumpe geleitet. In einem weiteren Kreislauf, dem Wärmetauscher der Wärmepumpe, wird die Erdwärme auf ein Kältemittel übertragen und erhitzt sich. Diese Wärme kann im Wärmeverteils- und Speichersystem eines Gebäudes als Heizenergie wieder abgegeben werden.

Darin zirkuliert als Heizmedium in der Regel Wasser. Dieses Wasser nimmt die Wärme, die das Kältemittel im Verflüssiger abgibt, auf und leitet dieses entweder zu einem Verteilersystem, wie z.B. Flächenheizungen oder Heizkörpern oder zu einem Heizungspuffer- bzw. Warmwasserspeicher (nach BWP 2021) weiter. Abhängig von der Vor- und Rücklauftemperatur des Wärmepumpentyps ergibt sich die Energieeffizienz der Heizanlage. Mit möglichst hoher Jahresarbeitszahl (JAZ) arbeiten Niedertemperaturheizungen und sind daher ideal in



Verbindung mit einer Wärmepumpe, da sie die Wärme auf wirtschaftliche Art und Weise zur Verfügung stellen und dadurch niedrige Vorlauftemperaturen zwischen 30 und 35 °C nutzen.

Abb. 46: Funktion und Wärmequelle (BWP 2021)

Zudem hängen mit der JAZ auch die Fördermöglichkeiten für Ihre Wärmepumpe zusammen, d.h. je besser die JAZ ausfällt, desto wahrscheinlicher ist eine Förderung (nach BWP 2021). Für die Berechnungen in dieser Arbeit folgt die Auslegung einer oberflächennahen geothermischen Anlage nach der jährlichen Entzugsenergie anhand eines konkreten Beispiels. Dazu dient das Wärmepumpen-Modell Vitocal 350-G, das für große Anlagen geeignet ist und eine hohe Vorlauftemperatur bis 73 °C ermöglicht (s. Abb.71, VISSMANN 2018). Das Modell kann als Sole/Wasser-Wärmepumpe mit einer einstufigen Heizleistungen von 20,5 bis 42,3 kW sowie zweistufig zwischen 41,0 bis 84,6 kW arbeiten. Zusätzlich kann das Beispielmmodell als Wasser/Wasser-Wärmepumpe eingesetzt werden und erzielt dort eine Heizleistung von 25,4 bis 52,3 kW (einstufig) und von 50,8 bis 104,6 kW (zweistufig).

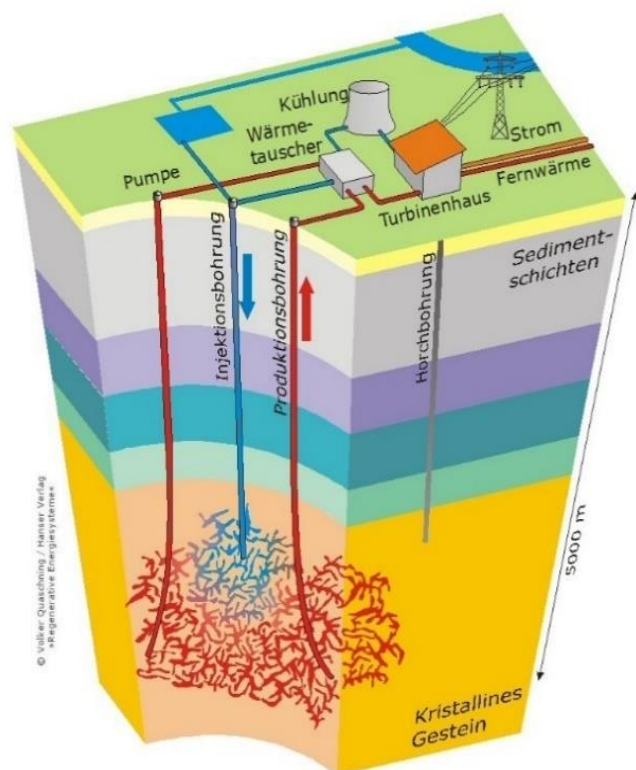


Abb. 47 Aufbau eines Erdwärmesondenfeldes (QUASCHNING, 2018)

5.2.3. Solarenergetische Voraussetzungen

Die Nutzung von Solarenergie verspricht nach dem heutigen Stand der Technik den höchsten Energieertrag. Die Solarenergie bietet die Möglichkeit Wärme über Solarthermie und Strom über Photovoltaik zu gewinnen. Technische Kombinationsmöglichkeiten bestehen mit anderen erneuerbaren Energien wie z.B. die Lieferung des Antriebsstroms für Wärme- und Kältepumpen. Für die Ermittlung des Energiepotenzials von Solarenergie wird die regionale Sonneneinstrahlung auf die nutzbaren Flächen ermittelt, deren Eigenschaften maßgeblich für die Installation von Solaranlagen sind. Diese können auf Dachflächen, Fassaden, Park- und Freiflächen und neuerdings auch auf Agrarflächen errichtet werden (MF BW 2021b).

Großräumig betrachtet liegt Tübingen in den wechselfeuchten Mittelbreiten, mit einer Jahressumme an Globalstrahlung zwischen ca. 980 kWh/m² (Flensburg) und 1.200 kWh/m² (Freiburg). Nach den Angaben des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) herrschen in Tübingen im langfristigen Mittel Einstrahlungswerte um 1.100 kWh/m² im Jahr (DWD, 1981-2000, s. Abb. 48+49). In Tübingen lassen sich erhebliche saisonale und räumliche Differenzierungen beobachten, die bei der vorliegenden Potentialanalyse berücksichtigt sind.

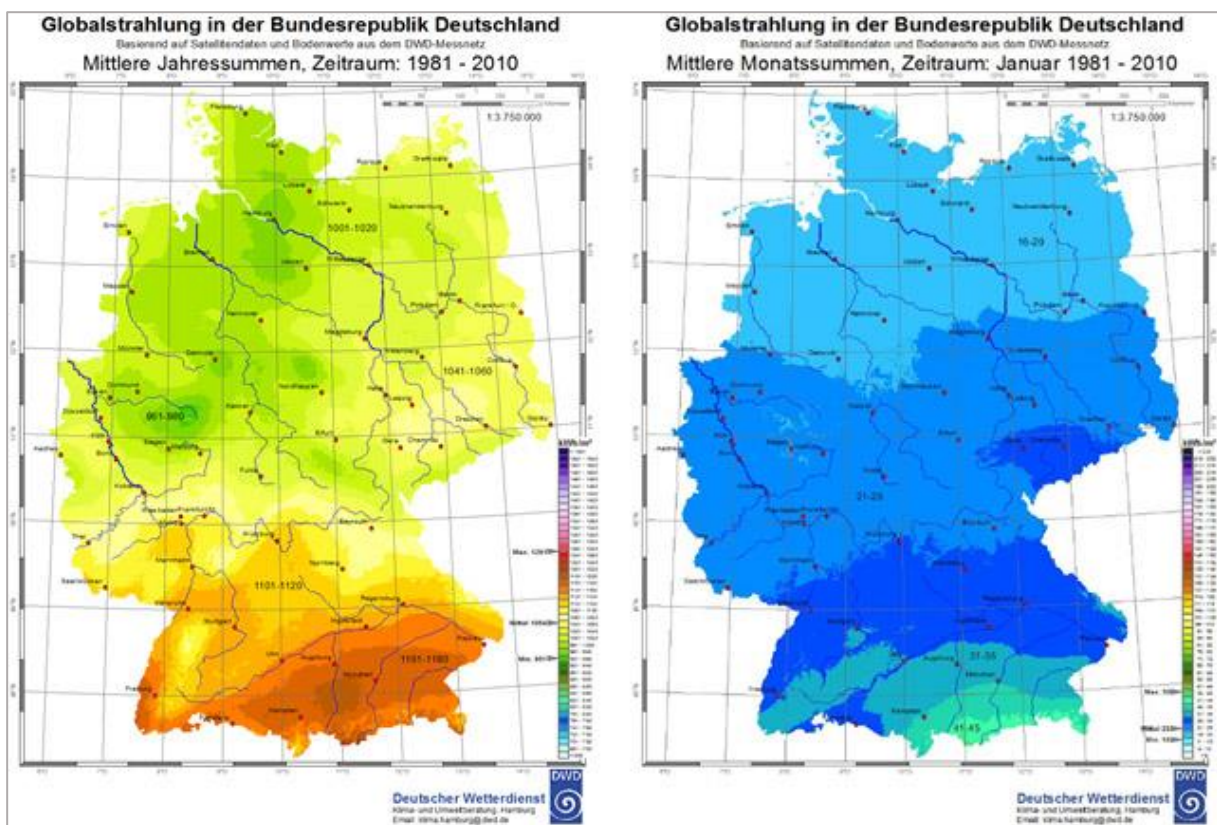


Abb. 48+49: Globalstrahlung BRD (1981-2010) Mittlere Monats- und Jahressummen (DWD 2021)

In der Solarpotenzialanalyse sind Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet, die meteorologische Einstrahlungswerte über einen Zeitraum von 30 Jahren mit einer halbstündlichen Auflösung beinhalten. Auffallend darin, war das Jahr 2011, indem saisonale Unterschiede zwischen Winter und Sommer deutlich hervorstechen: die höchsten Einstrahlungswerte 2011 im Mai lagen mit 191,7 Sonnenstunden bei einen überdurchschnittlichen Einstrahlungswert von 195 kWh/m² höher als der Juli. Der Mai 2011 verzeichnete damit die höchsten Einstrahlungswerte des Jahres.

Vom Gesamtpotenzial für Photovoltaik in Baden-Württemberg ergibt sich ein verbleibendes Potenzial von 56.260,3 MW (90 % nach dem Stand von 12/2020 (LUBW 2022b)). Die räumlichen Unterschiede lassen sich beim Vergleich folgender Messstationen verdeutlichen. Die regionalen Einstrahlungswerte weisen in Tübingen Unterschiede zwischen den Höhenlagen und den Neckartallagen auf. Eine reliefbedingte Horizontabschattung durch die hügelige Landschaft südlich von Tübingen verursacht verminderte Einstrahlungswerte. Auch die Flussnebel des Neckars tragen signifikant zur Einschränkung der Sonneneinstrahlung im Neckarteil bei und sind in den niedrigeren Lagen die Ursache für eine reduzierte Sonneneinstrahlung während der Vormittagsstunden des Winterhalbjahres.

Hingegen verzeichnen die Höhenlagen in Tübingen geringe Beeinträchtigung durch Nebel. Viele bebaute Hanglagen der Stadt weisen eine ausgeprägte Südexposition auf. So wurde für die Jahre 1990-1992 an der Messstation Horemer (Höhenlage bei Waldhäuser Ost) eine Globalstrahlung von 2.226.408 W/m² ermittelt, während an der Station Weilheim, im breiten Neckartal gelegen, im gleichen Zeitraum nur 2.164.319 W/m² gemessen wurden. Dies entspricht einer Differenz von 62.089 W/m² im Jahr 62 kW zwischen Höhen- und Tallage. Auf den Höhenlagen in Tübingen herrscht geringe Beeinträchtigung durch Nebel, in den frühen Morgenstunden ergeben sich hohe direkte Einstrahlungswerte. Hier besteht bis 14 Uhr sogar ein Strahlungsüberfluss, der auch zur Erwärmung der ostexponierten Hänge führt (DWD 2018) ²⁵.

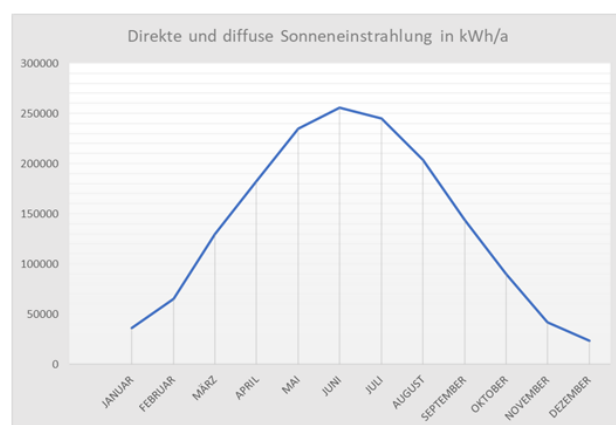
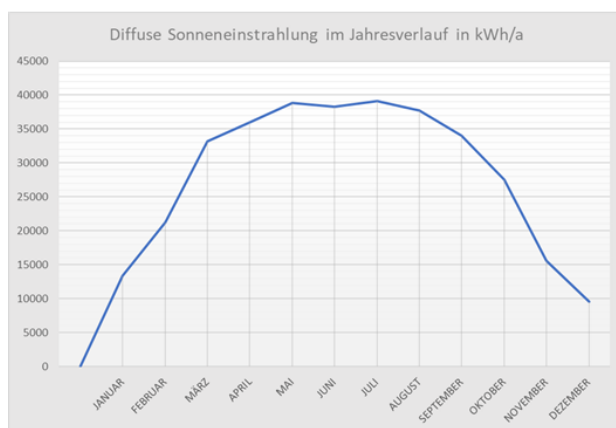
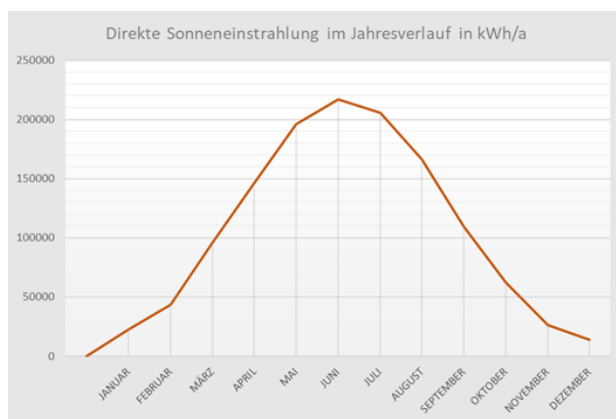
Tab. 10: Auszug aus Deutscher Wetterdienst Stuttgart: Werte für Tübingen (DWD 2018)

Monate	Stunden (h)	Monate	Stunden (h)
Januar	61,1	Juli	233,3
Februar	84,9	August	205,2
März	119,1	September	165,9
April	153,5	Oktober	127,9
Mai	191,7	November	73,8
Juni	208,2	Dezember	59,6
Summe Sonnenscheindauer im Jahr 2018: 1.684,7 h			

Dies verursacht einen nicht unwesentlichen Strahlungs- und Temperaturanstieg auf Gewerbe- und Industrieflächen. Die Dächer absorbieren die Strahlung, die bei dichter Überbauung zu einer umso größeren Fläche von überwärmten Baukörpern führt. Eine Dachneigung von 30° stellt die ideale Dachneigung zum Einstrahlungswinkel der Sonne dar. Diese Standorte sind durch Strahlung und Temperaturanstieg sehr gut für Photovoltaik und Solarthermie geeignet. Die wärmsten Standorte sind im Bereich Waldhäuser Ost, den Schnarrenberg-Kliniken und entlang des südwestlichen Hanges zur Innenstadt (vgl. MANTON et al. 2012, MANTON et al. 2016).

²⁵ Deutscher Wetterdienst, Langjähriges Mittel 1981-2010. Rasterdaten, Gauß-Krüger-Koordinatensystem/PotsdamDatum.9. Längengrad (DHDN 3) Zeilen 726 bis 733, Wertespalten 222-228, 2011, Hamburg.) Mit den gelieferten Werten des DWD wie Globalstrahlungswerte, diffuse und direkte Strahlung, Verhältnisse von diffus und direkt zu potenzieller Strahlung und täglichen Sonnenscheinstunden wurde die tatsächliche Strahlung berechnet. Auch die Berechnung der atmosphärischen Verluste konnte mit Hilfe der DWD-Daten in das Werkzeug „Potential Incoming Solar Radiation“, SagaGIS eingegeben und bei den Berechnungen berücksichtigt werden.

Für Tübingen wurde die Sonnenstunden vom Deutschen Wetterdienst wie folgt ermittelt:



Die nebenstehenden Abbildungen zeigen die durchschnittliche Sonneneinstrahlung im Untersuchungsgebiet Tübingen, die aus den langjährigen Mittel (1981-2010) ergehen. Separat ist die direkte und diffuse sowie die Gesamtstrahlung in Diagrammen dargestellt, die den Verlauf über das Jahr verdeutlicht. Auch hier sind die höchsten Werte im April, Mai und Juni zu erkennen

Das dreidimensionale Oberflächenmodell und das Höhenmodell ermöglichte eine genaue Berechnung der Einstrahlungssummen auf den digitalisierten Dachflächen des Untersuchungsgebiets. Mit Hilfe des Werkzeugs *Potential Incoming Solar Radiation* des Softwarepakets *SagaGIS* (BOEHNER 2009, WILSON 2000, HOFIERKA 2002) wurden die realen Neigungswinkel, die Ausrichtung zum Sonnenstand, Höhenlage und Verschattung der Dächer durch permanente Objekte im Tages- und Jahresverlauf, berücksichtigt (s. Abb. 50-52).

Das Werkzeug *Potential Incoming Solar Radiation* simuliert den Sonnenstand eines Ortes aufgrund zwei verschiedener Winkel: die Sonnenhöhe (Elevation) γ_s und das Sonnenazimut. Die Sonnenhöhe Ost ist nach DIN 5034 (DIN 2022) als der Winkel zwischen dem Sonnenmittelpunkt und dem Horizont, definiert. Das Sonnenazimut stellt den Winkel zwischen der geographischen Nordrichtung und dem Vertikalkreis durch den Sonnenmittelpunkt (0° =Nord, 90° =O, 180° =S,

270° =W) dar.

Abb. 50-51-52: Solareinstrahlung im Untersuchungsgebiet: direkte, diffuse und Gesamtstrahlung im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung).

Die Sonnenhöhe und Sonnenazimut²⁶ sind vom geographischen Standort, Datum und Uhrzeit abhängig. Hierbei spielt der Winkel zwischen dem Sonnenmittelpunkt und dem Himmelsäquator, die

²⁶ Das Sonnenstandsdiagramm wird für die Berechnung des Sonnenverlaufs genutzt. Mit der geographischen Breite ϕ des Ortes und dem Stundenwinkel lassen sich nun Sonnenhöhe γ_s und Sonnenazimut berechnen. Aus der lokalen Zeitzone LZ und der Zeitzone λ z.B. mitteleuropäischer Zeit MEZ 1 h mitteleuropäischer Sommerzeit MESZ= 2h wird abhängig von der geographischen Länge λ die mittlere Ortszeit ermittelt, aus der sich mit Hilfe der Zeitgleichung zgl. die wahre Ortszeit ergibt.

Sonnendeklination δ , die sich im Laufe eines Jahres im Bereich $+23^{\circ}26,5' > \delta > -23^{\circ}26,5'$ bewegt, die größte Rolle. Auch jahreszeitliche Schwankungen in der Länge des Sonnentages, werden mitberücksichtigt sind.

Das Universitätsgebäude „Neue Aula“ wird von den Bäumen südlich des Gebäudes verschattet. Dies zeigt sich eindeutig im Schattenwurf (Abb. 53).

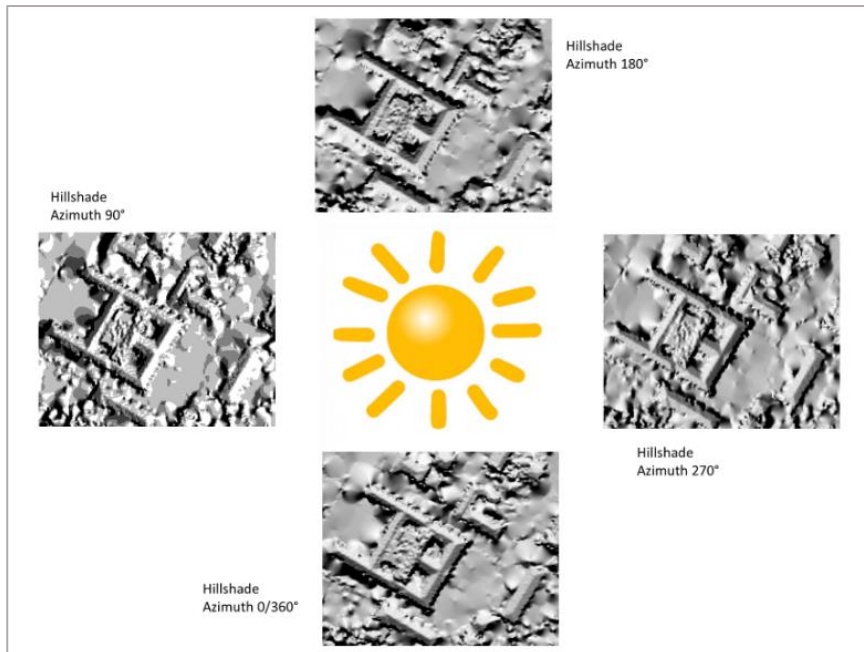


Abb. 53: Analytisches Hillshade der Neuen Aula Universität Tübingen (SOMMER 2015).

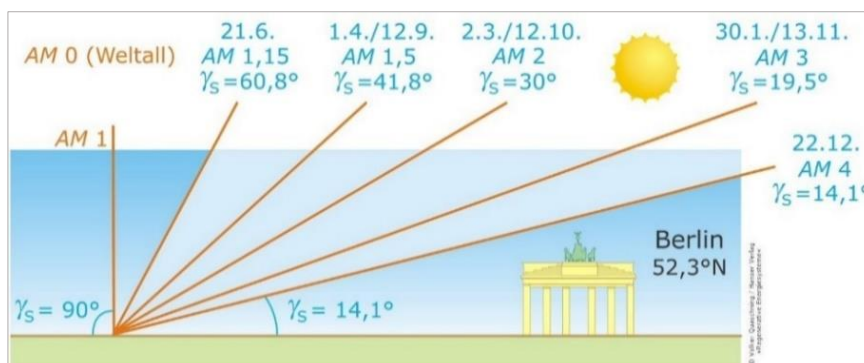


Abb. 54: Sonneneinstrahlungswinkel im Jahresverlauf (QUASCHNING, 2018)

Verschattungen sind Folge von Streuung durch Hindernisse, indem die direkte Strahlung vom getroffenen Objekt teilweise absorbiert und reflektiert wird. Die Streuung geschieht allerdings nicht nur an sichtbaren Objekten, sondern besteht bereits in großem Maße durch Schwebepartikel in der Atmosphäre. Hier wird unter temporären und permanenten Verschattungen²⁷ unterschieden. Die Entfernung und die Abmessung der schattenwerfenden Objekte, der Verlauf des Schattens mit dem Sonnenverlauf je nach Azimut und Höhenwinkel wurde gis-basiert ermittelt. Daraus ergaben sich trotz gleicher regionaler Einstrahlungsverhältnisse sehr unterschiedliche Eignungsklassen der Dachflächen im Untersuchungsgebiet (s. Kap. 7.1.).

²⁷ Temporäre Verschattungen werden durch Schneefall, Laub, Vogelekrementen und Verschmutzungen hervorgerufen, während permanente Verschattungen durch die Umgebung wie z.B. Bäume oder Hügel, Schornsteine, Giebel, Gauben etc. entstehen.

Über die dreidimensional dargestellte Landschaft werden Polygonzüge mit Kugelkoordinaten gelegt, die die Sonnenposition bestimmen lassen und in ein Sonnenstandsdiagramm übertragen werden. Im simulierten Jahresverlauf des Sonnenstandes werden Verschattungen erkennbar. Der direkte Verschattungsgrad wird durch die Ermittlung von Schnittpunkten berechnet. Der Einfallswinkel ist der Winkel zwischen einem Vektor s in Sonnenrichtung und dem Normalvektor N der Ebene. Da die Sonnenposition bisher in Kugelkoordinaten bestimmt wurde, wird sie in kartesische Koordinaten mit Basisvektoren in Richtung Nord, West und Zenit umgerechnet (s. Abb. 55 + 56). Dabei werden waagerechte Polygone zwischen Gegenständen gezogen. Wenn die Schnittpunkte innerhalb der Polygone fallen, liegen Verschattungen vor, da diese Linien für die direkte Sonneneinstrahlung stehen, welche somit von den Polygonen unterbrochen wird. Hierfür wird ein Beobachterpunkt festgelegt, der am niedrigsten Punkt des Daches ansetzt (siehe auch Abb. 57).

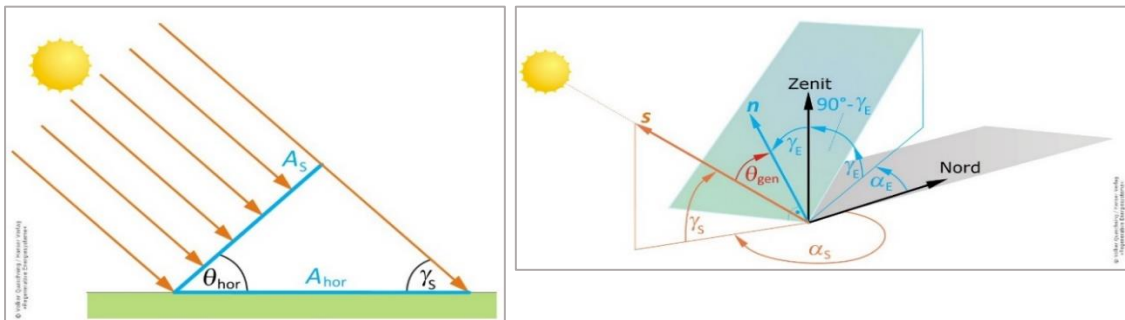


Abb. 55 + 56: Berechnung von Solareinstrahlung und Entfernung (Quaschnig, 2018)

Die Abschattungswahrscheinlichkeit wird über die Höhenwinkel und Azimutwinkel berechnet. Die Angaben zu Air Mass (Weglänge der Strahlung) sowie Rayleigh-Strahlung und Transmissibilität werden hier nicht weiter ausgeführt, sie sind in den Veröffentlichungen der Projektarbeiten zu finden sowie im spezifischen Erweiterungselement Solarpotentialmodell *ArcGIS Spatial Analyst* (ESRI 2015b, basieren auf *FU et al. 2000a*, *FU et al. 2000b*, *FU et al. 2002*, und *RICH et al.1994*, *RICH et al. 2000*, *BENFER 2008*, *ENßLE 2009*, *ENGEL & DÖLLNER 2010*).

5.2.4. Stadtbild-Verordnung der Stadt Tübingen

In der Stadtbildsatzung der Universitätsstadt Tübingen (vom 27.08.2008) wird die Erhaltung und Gestaltung des historischen Stadt- und Straßenbildes im Tübinger Stadtkern geregelt. Das zusammenhängende größere und unverwechselbare Altstadtgefüge soll für die Zukunft bewahrt werden. Die Vorgaben beinhalten detaillierte Bauvorschriften für eine einheitliche Dachlandschaft. Diese Vorschriften betreffen insbesondere die Installation von Solaranlagen auf sichtbaren Dachflächen. In § 5 c wird die Zulässigkeit für Solaranlagen konkret als unzulässig beschrieben, wenn die Dachflächen öffentlichen Verkehrsraum aus sichtbar sind. Die Anlagen sind Kenntnissgabepflichtig. Ausnahmen sind im Rahmen von § 19 möglich, wenn die Farbgebung der Dächer z.B. der Solaranlagen in dunklen Tönen auszuführen ist.

Die Stadt Tübingen unterstützt den Bau von privaten und gewerblichen Photovoltaikanlagen durch das Förderprogramm „Photovoltaik ist Trumpf“ und verweist auf die genannte Stadtbildsatzung. Laut Landesbauordnung Baden-Württemberg (LBO) sind PV-Anlagen ohne Bauantrag zu genehmigen. Jedoch dürfen die PV-Anlagen nicht den öffentlich-rechtlichen Vorschriften widersprechen (z. B. Abstandsregeln,

Gebäudehöhen, Festsetzungen im Bebauungsplan). Eine Genehmigungspflicht besteht bei Solaranlagen auf denkmalgeschützten Gebäuden. Für Bürger und Genossenschaften bietet die Stadt eine Alternative durch das Pachtmodell „swt-Energiedach“. Hierfür stellen die Eigentümer ihre Dachfläche zur Verfügung und pachten die PV-Anlage zur Eigenverbrauchsnutzung. Die Stadtwerke (swt) übernehmen gegen eine Pachtgebühr die Installation, Wartung und Finanzierung der PV-Anlagen (Stadtwerke Tübingen 2021).

Eine zusätzliche Prüfung in Bezug auf die Dachstruktur, die Traglast und Statik der Dächer notwendig, um alle baulichen Merkmale bei der Planung einer optimierten Anlage zu berücksichtigen. Zusätzlich beschränken sich die Einsatzmöglichkeiten nicht ausschließlich auf die Dachmontage, sondern können ebenfalls an den Gebäudefassaden und in den Sonnenschutz integriert werden. Bei Anlagen auf Freiflächen besteht die Möglichkeit, Photovoltaik mit der Agrarnutzung zu kombinieren (MF BW 2021b).

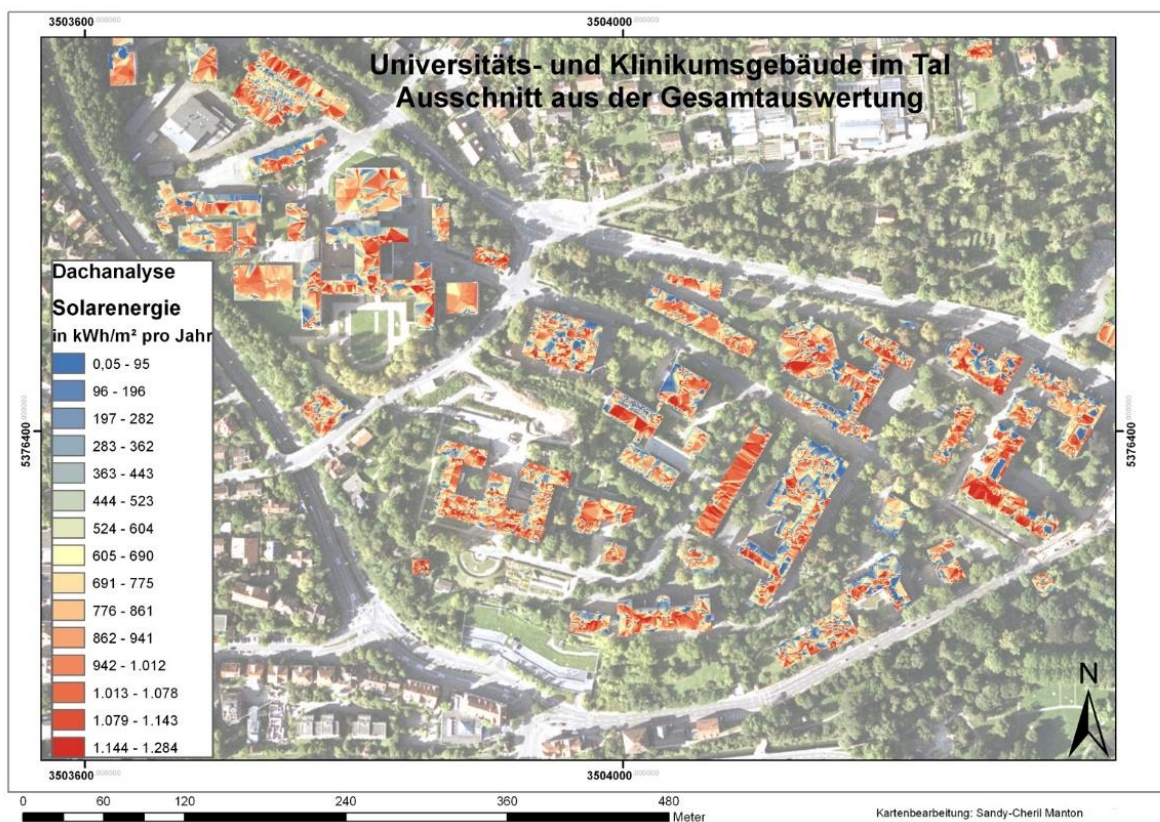


Abb. 57: Auszug des Solarpotenzialanalyse (MANTON et al 2016)

5.3. Datengrundlage

Die Datenverfügbarkeit und die Rahmenbedingungen dieser Arbeit ergaben sich aus dem Projekt (s. Einleitung). Für die Bearbeitung wurden folgende Programme verwendet: ArcGIS 10, Erdas Imagine 2010, LPS 2010 sowie ArcScene 10. Die Datenbank zu Solar und Geothermie wurde in mehreren Schritten über die Projektzeit verbessert und vervollständigt. Die Erstellung der Geodatenbasis für jeweils Geothermie und Solarenergie werden in Tab. 11 zeitlich und fachlich eingeordnet.

Tab. 11: Chronologischer Datenbankaufbau im Rahmen der Projektlaufzeit von 2013 -2016 (MANTON)

Arbeitsschritte	Geothermie	Solarenergie	Flächen	Gebäude
Raster-Simulation	<p><i>Vorarbeiten 2010-2012 des Technischen Betriebsamtes (tba):</i> Integration der Energieverbrauchsdaten von 2011, Entwicklung des Workflows, Beschaffung der Datengrundlage: DEM (LIDAR, 1m) DOM (LIDAR, 5m) Orthophotos (1m), Flurstücksauswertung (ATKIS, ALKIS), Digitalisierung von First- und Trauflinien in ArcGIS. Übertragung der Gebäudegrundrisse anhand der Luftbilder, Veröffentlichung der Vorergebnisse (<i>Manton et.al 2012</i>), Antragstellung Innovations- und Qualitätsfond (IQF), Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst (MWK) Stuttgart, Förderrunde 2012.</p>			
<p>Kooperationsprojekt: Innovatives Energie- und Umweltkonzept für die Gebäude des Universitätsklinikums und der Universität Tübingen, Projektpartner: Prof. Dr. Volker Hochschild, Dipl.-Ing. Jürgen Bunzel, Prof. Dr. Jens Bange, Projektlaufzeit 2013-2016.</p>				
Qualifizierungsarbeiten und studentische Hilfsarbeiten	<p><i>Sarah Lehmann (2012):</i> Auswertung der Bohrprofile und Bestimmung der Flurstücke und Gebäude (Diplomarbeit).</p> <p><i>Matthias Leicht (2014):</i> Simulationen zur oberflächennahen Geothermie in Tübingen (Diplomarbeit).</p>	<p><i>Christian Sommer (2014):</i> Point Cloud, euklidische Distanz, Berechnung der Punktdichte pro Objekt, Vergleich Interpolationsmethoden (RMSE DOM- Point Cloud, stud. Hilfskraft).</p>	<p><i>Karsten Hager (2011):</i> Standortbestimmung, Koordinatenbestimmung, Neigung und Ausrichtung der Dachflächen, (stud. Hilfskraft).</p>	<p><i>Janne Poppelmann und Saskia Hurler:</i> Digitalisierung der Grundrisse, Dachflächen auf Basis des DOM (LIDAR, 5m), Abgleich mit stereoskopischen Luftbildern (25cm) (stud. Hilfskraft).</p>
Auswertungen der Potenzial-Analysen	<p><i>Christian Bödinger (2015):</i> Zusammenfassung der Koordinaten und Werte, Vervollständigung des Datensatzes weiterer Bohrprofile, Wärmeleitfähigkeit und Jahresarbeit, Rastersimulationen, Werteextraktion (Bachelorarbeit und stud. Hilfskraft.)</p>	<p><i>Christian Sommer (2015):</i> Einstrahlungssimulationen, Werte Extraktion aus Raster, Gewinnung der Einzelwerte, (stud. Hilfskraft).</p>	<p>Bestimmung der Standorte, Flächengrößen, Auswertung nach Gebäuden, Ableitung des DOMs aus LIDAR, Verbesserung des Datensatzes 80,6m) (stud. Hilfskraft).</p>	<p>Bestimmung der Flächengrößen, Zuweisung von Attributdaten, Anpassung an neues DOM, Polygone, (stud. Hilfskraft).</p>
Qualitative Auswertungen	<p><i>Sandy-Cheril Manton (2017-2022):</i> Berechnung der Heizlast, Auslegung der Wärmepumpen, Entzugsleistung, Investitionsvolumen, CO₂-Steuerwerte.</p>	<p>Berechnung der Installierten Leistung, Modulanzahl, PV-Anlagengröße, Investitionsvolumen, CO₂-Steuerwerte und EEG-Vergütung.</p>	<p>Sondenlänge pro Gebäudegrundfläche und PV-Modulanzahl pro Dachfläche, Flächenbewertung nach Indikatoren. Rangfolgenbildung, Standortbewertung.</p>	<p>CO₂-Bewertung nach CO₂-Emission und CO₂-Reduktion, Ableitung des Stufenplans für die Erreichung der Klimaneutralität 2030.</p>

5.3.1. Geothermische Datengrundlage

Die Grundlage der Geodaten bildet ein digitales Geländemodell (1m Auflösung) und ein digitales Oberflächenmodell (5m Auflösung) des Landesvermessungsamtes Stuttgart, sowie stereoskopische Luftbilder (25cm Auflösung) aus dem Jahr 2008. Die geologischen Bohrprofile des ISONG-Servers der Landesanstalt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) und Wärmeleitfähigkeit bilden zusammen mit dem Schichtenverlauf die Datengrundlage für die Potenzialanalyse für Erdwärme. Für den Aufbau einer geologischen Datenbank wurden vom Internet-Server der Landesanstalt für Rohstoffe, Geologie und Bergbau in Freiburg (LRGB) 200 punktuelle Abfragen an relevanten Standorten im simulationsbasierten ISONG - Informationssystem oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg (ISONG – Server des LGRB) erstellt. Die Bohrprofile wurden in das Höhenmodell übertragen und mit der geologischen Karte von Tübingen und Umgebung (1:50.000) ergänzt.

Die geothermische Potenzialanalyse wurde in einem Mehrstufenverfahren erstellt. Die Arbeitsmethode wurde bereits 2010 bis 2012 im Rahmen der Vorarbeiten des Technischen Betriebsamtes erarbeitet (Manton et al. 2012). Für die Berechnung der verfügbaren Erdwärme in Tübingen wurden die Werte der *Wärmeleitfähigkeiten* der anstehenden Gesteinsschichten dem VDI-Leitfaden entnommen. Nach den Vorgaben des VDI 4640 Blatt 1 wurden die Gesteinstypen nach Entstehung, Dichte und Wassergehalt unterteilt²⁵. Die verfeinerte Datenbank des im Jahr 2016 abgeschlossenen IQF-Projekts wurde mit den Potenzialwerten erweitert, die unter Berücksichtigung der Schichtmächtigkeit pro Gesteinsschicht und der jeweiligen Wärmeleitfähigkeit der Gesteine berechnet wurden (MANTON et al 2012, BÖDINGER 2015, MANTON 2018)²⁸.

5.3.2. Solare Datengrundlage

Die Einstrahlung unter Berücksichtigung der Neigung und Ausrichtung der Flächen geht aus dem DOM hervor²⁹. Die auf diese Weise ermittelten Werte der globalen Solarstrahlung auf den Dachflächen bilden zusammen mit den Flächenwerten aus der Digitalisierung die Datengrundlage für die Solarpotenzialanalyse. Die ersten Ergebnisse der Solarpotenzialanalyse wiesen zu hohe Verzerrungsraten auf, die eine Überarbeitung erforderlich machten (Manton, 2012; Manton et al., 2012). Mit der Förderbewilligung im Jahr 2012 wurden Laserscanndaten mit einer 60 cm-Auflösung gekauft und für die Ableitung des Oberflächenmodells verwendet³⁰. Zur Berechnung des Solarpotenzials wurden für das gesamte Untersuchungsgebiet digitale LIDAR-Daten genutzt. Die hochauflösenden Punktwolken der einzelnen Kacheln wurden zusammengesetzt und ergaben ein Oberflächenmodell für das gesamte Stadtgebiet Tübingen.

Die atmosphärischen Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2018) enthielten Angaben zu den stündlichen Messungen seit 01.01.1979 sowie das langjährige Mittel aus 35 Jahren Messung. Außerdem

²⁸ Nähere Erläuterungen zu den Simulationen sind in Manton et al 2012, Manton et al 2016, Bödinger 2015, nachzulesen.

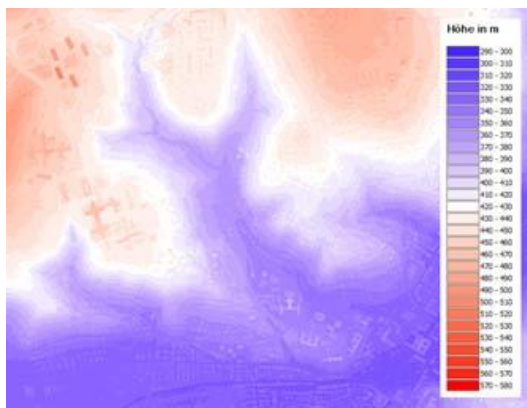
²⁹ MS Office ARC GIS Esri, Erweiterungen Spatial Analyst, Solarradiation, Arc Scene 3D-Simulation, SAGA, Ecognition, Python Skript Programmierung, Geohand, LibreOffice, Endnote, Projektion der Gis-Projekte: Gaus-Krüger: Degree 3 Zone.

³⁰ Weitere Details unter Abschlussbericht des Kooperationsprojekts „Innovatives Umwelt- und Energiekonzept der Gebäude des Universitätsklinikums und der Universität Tübingen“ (Bange, J., Hochschild, V., Bunzel, J. (2016) Projektbericht) Tübingen.

wurde das Verhältnis von tatsächlicher zu potenzieller Einstrahlung berechnet und der atmosphärische Verlust ermittelt. Weitere Berechnungen zu Bewölkung und Sonnenscheindauer sind enthalten. Der daraus verwendete Wetterfaktor ergab sich aus der Auswertung meteorologischer Einstrahlungswerte über einen Zeitraum von 30 Jahren mit halbstündlicher Auflösung. Dem Wetterdatensatz wurden Daten für extraterrestrische, globale und diffuse Strahlung entnommen, die in J/h mit stündlicher Auflösung berechnet wurden (DWD 2018)³¹.

5.3.3. Digitales Geländemodell (DEM)

Das digitale Geländemodell des Untersuchungsgebietes wurde aus den Laserscandaten des Landesvermessungsamtes von 2013 abgeleitet. Die Punktwolken wurden in First und Lastpulse Punkte sortiert. Aus den Lastpulse Daten wurde die Geländeoberfläche abgeleitet. Bei Flüssen und Seen wird i.d.R. die Wasseroberfläche und nicht der Untergrund berücksichtigt. Der ursprüngliche ASCII-Datensatz des LVA (Punktdatei, s.u.) wurde aus einer Laserscan-Befliegung in den Jahren 2000-2005 generiert. Die dabei gewonnenen einzelnen Höhenpunkte des Ausgangsdatensatzes wurden für die vorliegende Dissertation in

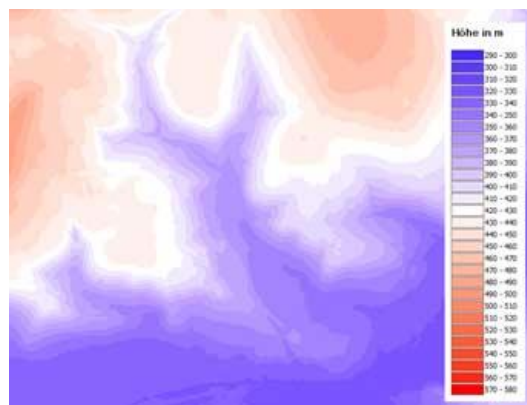


ein rasterbasiertes digitales Höhenmodell umgewandelt. Auf dieser Geländeoberfläche setzen die weiteren Berechnungen zum geothermischen Potenzial in Tübingen an.

Abb. 58: Das digitale Geländemodell aus LIDAR Daten 2013: Die Hillshade Darstellung verdeutlicht die Höhenlagen im Farbverlauf Blau (Täler) Rot (Höhen). Die Abstufungen lassen das Relief erkennen (Pixelgröße 1*1m, Gauß-Krüger/Zone3/Bessel 1841, eigene Darstellung).

Digitalisierung der Standorte

Zwar enthält das digitale Oberflächenmodell die Gebäudeumrisse, aus dieser Grundlage konnten jedoch keine genauen Gebäudekanten für eine exakte Dachabmessung abgeleitet werden. Das digitale Oberflächenmodell zeigt im Gegensatz zum digitalen Geländemodell die „greifbare Höhe der bedeckten Erdoberfläche“ über dem Meeresspiegel. Vegetation, Siedlungen, Infrastruktur und andere anthropogene

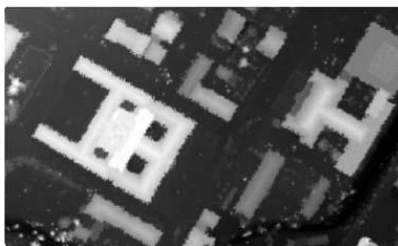
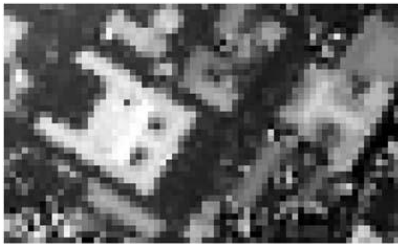
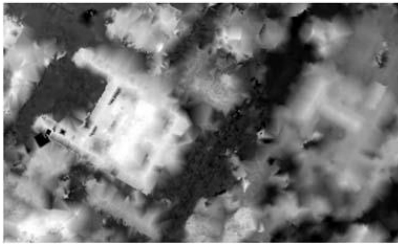


Bauten werden explizit berücksichtigt. Hier wurden bereits existierende Pläne des Gebäudebestandes herangezogen und anhand der Luftbilder /Orthophotos von 2012 nochmals digitalisiert und die Gebäudenummern zugewiesen.

Abb. 59: Ausschnitt aus dem digitalen Oberflächenmodell – DOM1. Teilgebiet von Tübingen Innenstadt und Kliniken (Pixelgröße 1*1m, Gauß-Krüger/Zone3/ Bessel 1841, eigene Darstellung).

³¹ DWD 2018: Langjähr. Mittel 1981-2010. Raster, G-K-Koord/Potsd. Datum, 9.Longitude (DHDN3), Zeilen 726-733, Wertespalten 222-228 (2011) Atmosphär. Daten (1979-2012) Hamburg.

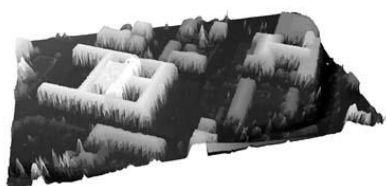
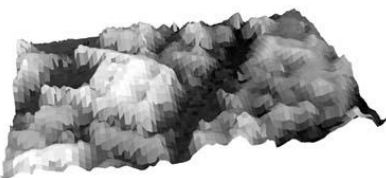
5.3.4. Das digitale Oberflächenmodell (DOM)



Zweidimensionale Ansicht

Der Vergleich der unterschiedlichen Daten-Grundlagen für die Solarberechnung zeigt sich anhand der folgenden Rasterdarstellungen. Die stereoskopische Luftbildauswertung mit Daten aus dem Jahr 2008 und einer Auflösung von 60 cm ergab dennoch eine unscharfe Abbildung der Umrise des Gebäudes Neue Aula (Abb.60). Im DOM mit einer 5 m Auflösung sind die Gebäuderänder ebenfalls noch nicht klar zu isolieren, um Polygone davon ableiten zu können. Dies erforderte eine Optimierung der Datengrundlage durch Digitalisierung der Gebäudegrundrisse in höhere Auflösung. Die LIDAR-Daten aus dem Jahr 2012 mit einer Auflösung von 1 m zeigen eine weit genauere Abgrenzung zwischen dem Gebäude und Umgebung. Damit konnten Gebäudeumrisse abgeleitet und in Polygone umgewandelt werden.

Abb. 60: Ausschnitt aus dem DOM/60cm /5 m und 1 m (eigene Darstellung)



Dreidimensionale Ansicht

In der dreidimensionalen Darstellung ist die Gebäudeform noch besser zu erkennen. In Abbildung 61 werden Gebäude wie „umhüllt“ dargestellt. Auch die LIDAR-Daten von 2008 sind nicht besser als die stereoskopischen Ableitungen. Erst in der Datengrundlage von 2012 wird eine Gebäudeform und die Dachkontur erkennbar. Auf dieser Basis erfolgten die Solarberechnungen. Alle Interpolationsverfahren haben gemeinsam, dass sie an Standorten ohne vorliegende Messdaten den wahrscheinlichsten Verlauf oder das Vorkommen errechnen. Die dabei verursachte Abweichung wurde mithilfe eines leistungsstarken Serverrechners rechnerisch verbessert, indem alle Kacheln zu einer großen Punktwolke zusammengefasst wurden. Das neue DOM bildet die Basis für alle weiteren Arbeitsschritte der Solarpotenzialanalyse.

Abb. 61: Ausschnitte aus dem 3D-Model, DOM (LVA 2008 und 2012/LIDAR)

Ableitung der Gebäude- und Dachgeometrie

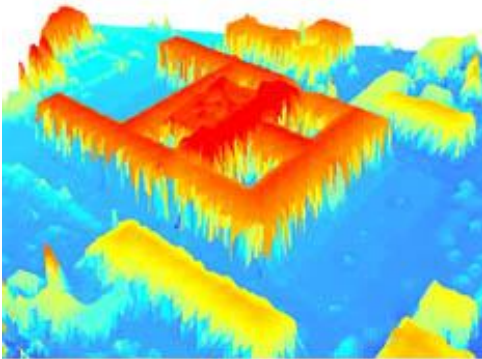


Abb. 62: Spline-Interpolation (Sommer 2015, unveröffentlicht).

Die folgenden Grafiken zeigen die Unterschiede der Interpolationsverfahren in der 3D-Modellierung aus den Punktwolken, welche für diese Arbeit die beste Datenbasis bildet. Die Erzeugung von geglätteten Oberflächen mit minimaler Krümmung aus den Messpunkten belegt, dass die Interpolation SPLINE hier die Dachkanten überschätzt und Ungenauigkeit erzeugt.

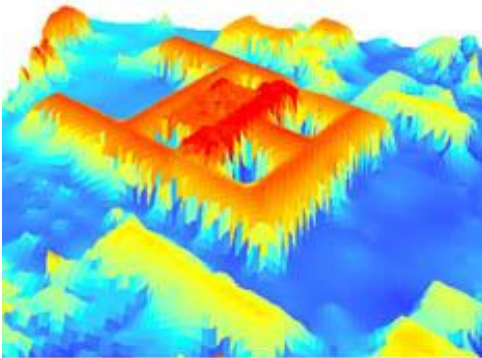


Abb. 63: Inverse-Distance Weighting (IDW) Interpolation (Sommer 2015, unveröffentlicht).

Da die IDW-Interpolation die Nachbar-Messpunkte je nach Wert des Exponenten und Gewichtung einbezieht, entstehen kreisförmige oder elliptische Interpolationsflächen, die detailreicher sind, jedoch noch nicht ausreichend für die Abbildung der Dachstrukturen.

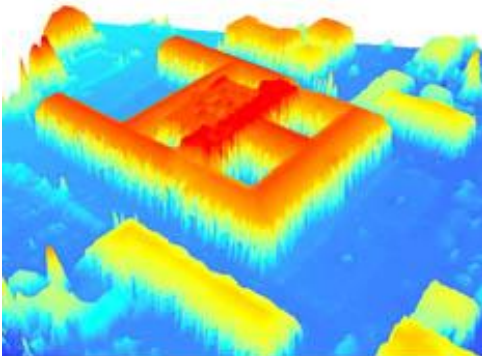


Abb. 64: Krigingverfahren - Nearest Neighbour (Sommer 2015, unveröffentlicht).

Durch gewichtete Mittelwerte, eine geringe Schätzvarianz und eine Distanzabhängigkeit erzeugt die Interpolationsmethode Kriging die besten Ergebnisse. Mit Natural Neighbours werden die nahegelegenen Messpunkte stärker gewichtet und bilden die Dachkanten besonders gut ab.

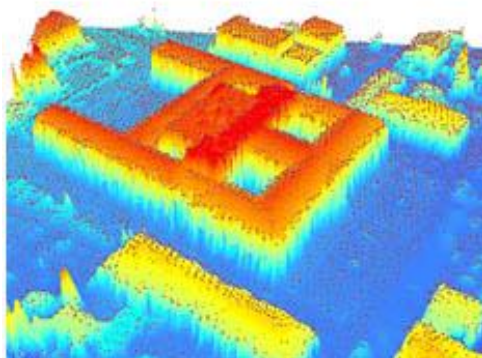


Abb. 65: Dichte der Punktwolke (Sommer 2015, unveröffentlicht).

Messpunkte für interpolationsverfahren. Hier ist die Punktwolke zu sehen, anhand dieser die Interpolationsmethoden ausgeführt wurden. Die Punktdichte entlang der Dachkanten ist unterschiedlich gut erkennbar.

5.3.5. Digitalisierung der Dachflächen

Um die Standorte digitalisieren zu können, wurde erst ein Digitales Oberflächenmodell abgeleitet und zusammengesetzt. Eine sich ergebende perspektivische Verzerrung der Dachflächengeometrien wurde an das neue DOM einzeln manuell angepasst. Dabei wurden mit Hilfe aufwendigen Verfahrens die Polygone der Gebäude hervorgehoben und an die tatsächliche Position versetzt. Durch eine Altitude von 60° wurden die Schlagschatten relativ kompakt gehalten (Spatial Analyst Tools/Surface/Hillshading) und mit dem *Raster Calculator* addiert, sodass die Schatten aller Himmelsrichtungen rund um das Gebäude laufen. (Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator).

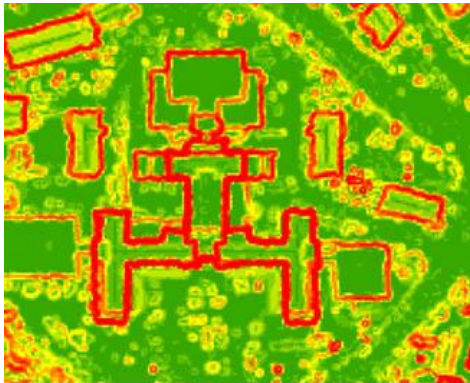


Abb. 66: Slope (Sommer, 2015 unveröffentlicht)

Die Neigung der Fläche bildet deutlich die Ränder (starke Neigung) und die Firste (Neigung = 0) ab (Spatial Analyst Tools/Surface/Slop). Die Randlinien sind nur sehr ungenau isolierbar und erfordern eine manuelle Nacharbeitung.

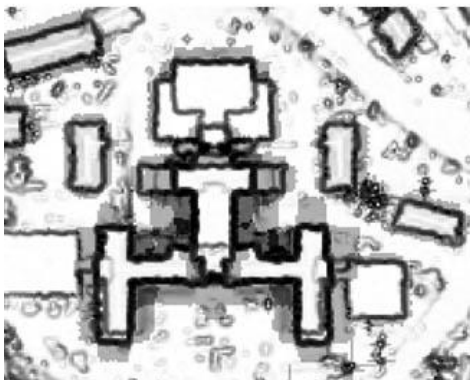


Abb. 67: Hillshade (Sommer, 2015 unveröffentlicht)

Die Hillshades wurden aus verschiedenen Himmelsrichtungen ermittelt, also Azimut = 90°, 180°, 270° & 360°. Ein weiterer Versuch der Linienisolierung durch die Darstellung des Schattenwurfs/ Hillshade zeigt ein ausreichendes Ergebnis.

Als Alternative wurde mit der Software Ecognition eine objektbasierte Image Analyse erprobt. Eine Segmentierung basierend auf Neigung (Aspect), Schattenwurf ermöglichte die Isolierung der Gebäudekanten und die Verwandlung der Linien in Polygone nur bedingt. Die „roten Ränder“ stellen den Neigungswinkel dar, der die Außenlinien der Gebäude isoliert und für die Ableitung der Polygone genutzt wurde. Allerdings konnten die Polygone nur teilweise anhand des DOMs übernommen werden. Die einzelnen Dachflächen wurden nochmals anhand der Luftbilder digitalisiert und mithilfe des DOMs an die richtigen Koordinaten angepasst. Eine manuelle Überarbeitung musste aufgrund unterschiedlicher Perspektiven erfolgen. Die Polygone wurden für die Extraktion der Solareinstrahlungswerte aus den berechneten Tagesrastern genutzt. Die täglichen Raster berücksichtigen den Sonnenverlauf im Jahresgang.

5.3.6. Energieverbrauchswerte und Kostenangaben

Die Verbrauchs- und Kostenangaben sowie die Gebäudemerkmale und Gebäudenummern wurden vom Technischen Betriebsamt (tba) zur Verfügung gestellt.

Etwa 10 % der Verbräuche sind durch automatisierte Zählerabfragen erfasst (Stand 2016). Mit der Software Ennovatis ermittelt das Energiemanagement teilweise stündliche und tägliche bzw. monatliche Verbrauchswerte und Gesamtjahreswerte pro Gebäude. Hier sind die jährlichen Verbrauchswerte in Kilowattstunden (kWh/a) für Berechnungen ausreichend. Etwa 80 % der Verbrauchswerte sind durch manuelle Ablesung erfasst (*Erhebung*). Diese Werte sind klimabereinigt und gebäudescharf angegeben (s. 5.1.2.+5.1.3.). Ca. 10 % erfolgt durch *Schätzung*, wodurch ein Teil der Verbrauchswerte von den tatsächlichen Verbräuchen abweichen kann, was aufgrund des standardisierten Schätzverfahrens von Energieverbräuchen in der Energiewirtschaft anerkannt ist. Somit gelten diese Werte in ihrer Gesamtheit hier als *erhoben*.

- **Die flächendeckende Darstellung aller 380 Gebäude bedingt die Beschränkung auf jährliche Werteangaben, anstelle von Monats- oder Tageswerten. Ebenso werden keine Tagesverlaufskurven analysiert.**

Die Verbrauchswerte (2015) beinhalten die Verbrauchsmengen pro Energiemedium (Liter, m³) und die genauen Energiekosten. Die Mengenangaben (in Liter, Volumen oder kg) wurden in kWh/a umgerechnet und sind Grundlage der CO₂-Berechnungen. Die Verbrauchstabellen unterscheiden sich in der Anzahl der aufgeführten Gebäude. Teilweise sind Gebäudekomplexe mit Gesamtwerten ausgegeben, teilweise sind die Gebäude einzeln aufgeführt, was zu unterschiedlichen Datenbeständen in dieser Arbeit führt und bei späteren Vergleichen alle Kartenblätter eine unterschiedliche Anzahl an Gebäuden beinhaltet.

- **Die Endergebnisse sind nicht für alle Gebäude der Einzeldatensätze verfügbar, die Teilberechnungen sind jeweils einsehbar.**

5.3.7. Aufbau der relationalen Datenbank

Die Ausgangsdaten bestehen aus *steifen und relationalen* Datenzeilen, die durch schlüsselfähige Datensätze mit einander verknüpft wurden. Das relationale Modell besitzt eine einfache satzorientierte Struktur, die aus flachen Tabellen besteht, in denen die Datenobjekte pro Zeile aufgelistet sind. Die gebäudespezifischen Ausgangsdaten (VuB & tba) boten drei unterschiedliche Zuordnungsmöglichkeiten für Datenverknüpfungen (Keycodes) mit den Vektordaten von ArcGIS (*Open Attribute Tables*). Die folgende Tabelle 12 unterteilt die bereits vorgestellten Daten nach Datentypen:

Tab. 12: Ausgangsdaten, Datentypen und Verwendung der Daten (eigene Darstellung)

Datentyp	Thematische Daten	Verwendung	Methode
Rasterdaten	<ul style="list-style-type: none"> • Geothermisches Potenzial - Geologischer Untergrund • Solarpotenzial - Dachneigung/Ausrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Potenzial Wärme-/Heizenergie • Potenzial: Elektrischer Strom 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulationen: Solar radiation calculation • Nearest Neighbour, IDW, Kriging
Vektordaten	<ul style="list-style-type: none"> • Flurstücke • Gebäudegrundrisse • Dachflächen 	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenerfassung (ATKIS, ALKIS) Standortbestimmung • Flächenbezogene Berechnungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Digitalisierung der Dachflächen (Polygone) • Extraktion der Einzelwerte (extract by mask) • flächendeckende Berechnungen
Attribute	<ul style="list-style-type: none"> • Energieverbrauch: Wärme/Strom • Energiekosten • Gebäudebezeichnungen • Gebäudemerkmale 	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung Deckungsgrad • Kostenvergleiche • Bedarfsberechnungen • Flächendeckende Anlagenkonfigurationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung • manuelle Eingaben • interaktive Abfragen • Vergleiche
Berechnete Flächenwerte	<ul style="list-style-type: none"> • Referenzwerte GEMIS • Flächenwerte pro Jahr (CO₂/m²), (Euro/m²) (kWh/m²), (Euro/kWh) 	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-Äquivalente (t CO₂) • CO₂-Emissionen (t CO₂) • CO₂-Steuerwert (Euro/ t CO₂) • CO₂-Flächenwert (CO₂/ m²) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bestimmung • Umrechnungen • Korrelationen • Zuweisungen
Inhalte		Form	Quellen
Räumliche Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Thematische Daten • Gebäudedaten • DOM, DEM (LIDAR) • Potenzialanalysen 	<ul style="list-style-type: none"> • Vektor- & Rasterdaten • Laserscanndaten 	<ul style="list-style-type: none"> • Technisches Betriebsamt (tba) • Amt für Vermögen u. Bau (VuB) Tübingen • Landesvermessungsamt (LVA)
Berechnungen in Excel-Tabellen	<ul style="list-style-type: none"> • Methodik • Datenverknüpfung & Beschreibungen, Kommentare • Berechnungen & Ergebnisse 	<ul style="list-style-type: none"> • Exceltabellen • Zahlen (Numerics und Strings) • Quantitative, steife, relationale Werte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Literaturrecherche & Quellenangaben, Referenzwerte • Praxisbeispiele • Rang- und Standortlisten • Eigene Erarbeitung
ArcGIS – Tabellen und Kartenmaterial	<ul style="list-style-type: none"> • Bereinigter Datensatz • Klassifizierungen, Filterung, Rangfolgenbildung • Ableitung von Indikatoren • Gewichtung • Ergebnisse und Stufenpläne 	<ul style="list-style-type: none"> • Histogramme, Tabellen und Diagramme • Kartenausschnitte & Übersichtskarten, Vergleichskarten • Graphiken & Schaubilder • Eigene Darstellungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Eigene Datenbanken • Eigene Berechnungen • Eigene Darstellungen

5.3.8. Verknüpfung der Ausgangsdaten

Die konvertierten Datensätze wurden mithilfe der *Keycodes* den digitalisierten Gebäudepolygonen zugewiesen. Die Standortdaten wurden mit Attribut-Tabellen zu Flächengröße, Koordinatensystem (Standort und Höhe ü.N.N.) ergänzt. Aus vielen Einzeltabellen wurde eine neue Projektabelle erstellt, die folgende Keycodes enthält:

1. Das **Object-ID-Feld (OID) in ArcGIS** weist jeder Zeile in einer Tabelle eine eindeutige Kennung zu. Die "OID" oder "Object-ID" enthält zum Polygonzug auch die Koordinaten des Standorts.
2. Die **interne Gebäudenummer** des Technischen Betriebsamtes (tba) ist eine 4-stellige Nummer, die pro Teildachfläche eine eigene Wertzuweisung erhielt: 1.311 Teildachflächen sind den Gebäuden zugewiesen: z.b. Gebäude 5001 -1 bis 5001-20 Teildachflächen.
3. die **Flurstücksnummern** der Flurstücke wurden bei der Zuweisung von Gebäuden genutzt, von denen keine anderen Angaben und andere Verknüpfungen möglich waren.

a) **Schlüsseltabelle Energieverbrauch und Kosten**

Anhand von internen Gebäudenummern (tba) wurden die Energieverbräuche von Wärme und Strom je nach Energiemedien für Strom, Heizöl, Erdgas, Fernwärme, Wasser/Abwasser, jeweils mit Kosten zugewiesen und die CO₂- Emissionen berechnet.

b) **Schlüsseltabelle Solareinstrahlung mit Details zu Dachflächen**

Die Gebäude (UKT und UT) wurden anhand von Liegenschaftskarten und Satellitenbildern digitalisiert und mit den intern geführten Gebäudenummern verknüpft. Die Polygonzüge in ArcGIS enthalten Werte zu Flächengröße, Koordinaten, Höhe ü.N.N., Ausrichtung, Neigung, Einstrahlung. Die Werte der Potenzialanalyse sind den Teildachflächen zugewiesen.

c) **Schlüsseltabelle Geothermie mit Details zur Geologie**

Die Flächenangaben der Gebäudegrundrisse unterscheiden sich von den Gebäudeaußenmauern, so bestanden unterschiedliche Flächenangaben. Für die geothermische Auswertung die Gebäudegrundflächen wurden die Potenzialwerte anhand der Koordinaten der Bohrprofile den Gebäudegrundrißen zugewiesen³².

³² Im Geographischen Informationssystem wurde für die visuelle Darstellung die Projektion „Projected Coordinate System, National Grids, DHDn3 Degree Gaus Krüger Zone 3“ gewählt.

6. Methoden der Flächenbewertung

Im folgenden Kapitel wird die Methodik für die Flächenbewertung in einzelnen Schritten vorgestellt. Das Schaubild (Abb.68) zeigt die Vorgehensweise in dieser Dissertation.

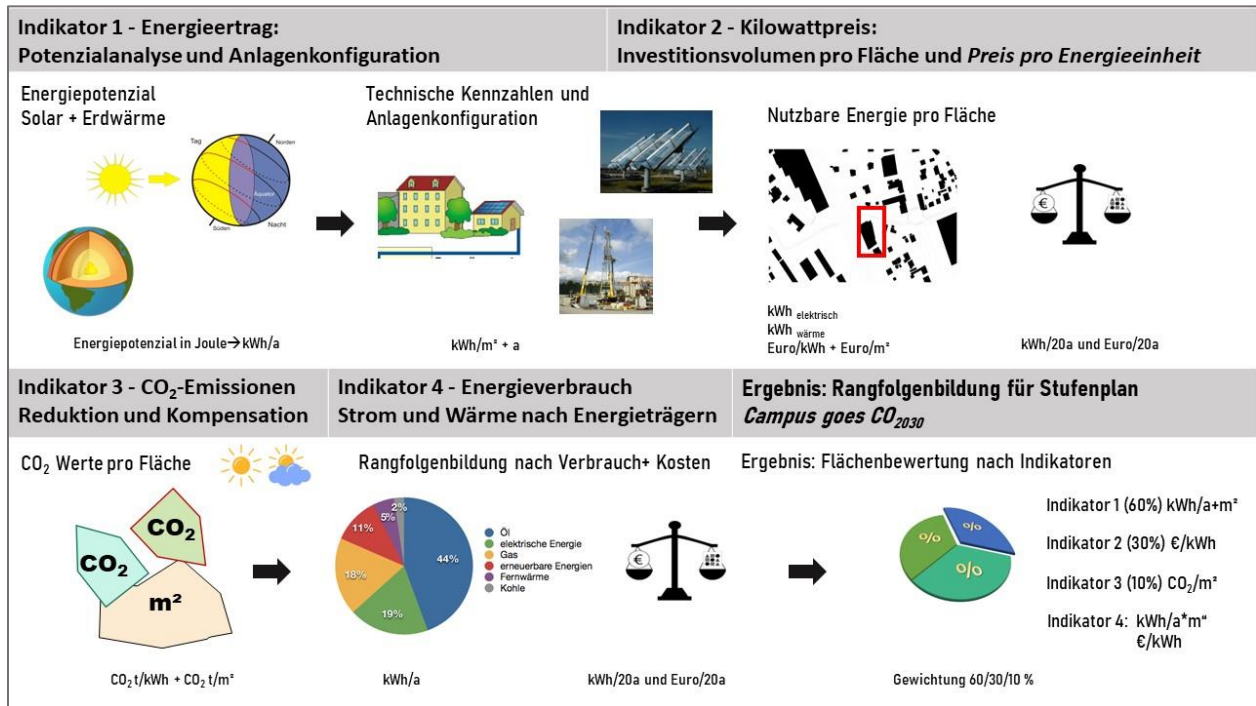


Abb. 68: Darstellung der Arbeitsschritte dieser Dissertation (eigene Darstellung)

- 1) Die Untersuchungsflächen werden nach ihrem energetischen Flächenwert bewertet. Diese Datengrundlage erging im ersten Schritt aus den Potenzialanalysen für Photovoltaik und oberflächennahe Geothermie.
- 2) Mit Berechnung des energetischen Potenzials in Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr für Solarstrom und Erdwärme sind technische Anlagenkonfigurationen für Photovoltaik-Solarmodule und Erdwärmepumpen berechnet worden, aus denen die nutzbare Energie als Jahresertrag (kWh_{el}/a) für Photovoltaik und als Heizlast (kWh_w/a) für Erdwärme ermittelt sind.
- 3) Mithilfe eines beispielhaften Solarmodultyps und einer Sole-Wärmepumpe wird das erforderliche Investitionsvolumen zur Errichtung der Anlagen bestimmt. Für unterschiedliche Anlagengrößen sind die Anfangsinvestitionskosten, die Betriebskosten im ersten Jahr und die Gesamtkosten für 20 Jahre für Photovoltaik und Erdwärmepumpen kalkuliert. Um mögliche Einnahmen durch die EEG-Einspeisevergütung und die möglichen Ausgaben für die EEG-Umlage mitberücksichtigen zu können, sind für alle Untersuchungsflächen entsprechende Kennzahlen in Euro berechnet worden und die Gesamtkosten für 20 Jahre sowie der zu erwartende Gesamtenergieertrag in 20 Jahren. Der Preis pro Energieeinheit (Kilowattpreis (Euro/kWh) wurde bestimmt, der die Standorte nach Eignung bewertet.

- 4) Für Energieerträge und Energieverbräuche wurden die äquivalenten CO₂-Werte nach GEMIS 4.93 bestimmt, um anschließende Berechnungen zu CO₂-Emissionen, -Reduktionspotenzial und CO₂-Kompensation durchzuführen.
- 5) Weiterführend sind mögliche Beträge für CO₂-Steuer und CO₂-Schattenpreise kalkuliert und Kostenszenarien simuliert.

Anhand der Strom- und Wärmeverbrauchswerte wird der theoretische Deckungsgrad für Wärme und Strom bestimmt und anhand der Verbrauchs- und Kostenwerte der Kilowattpreis des Verbrauchs berechnet und dem Kilowattpreis des erneuerbaren Energiepotenzials gegenübergestellt. Dieser Datenbestand wird nach den dort beschriebenen Merkmalen mithilfe des geographischen Informationssystems ArcGIS in Karten und Einzelansichten der Standorte visualisiert (s. Abb. 69).

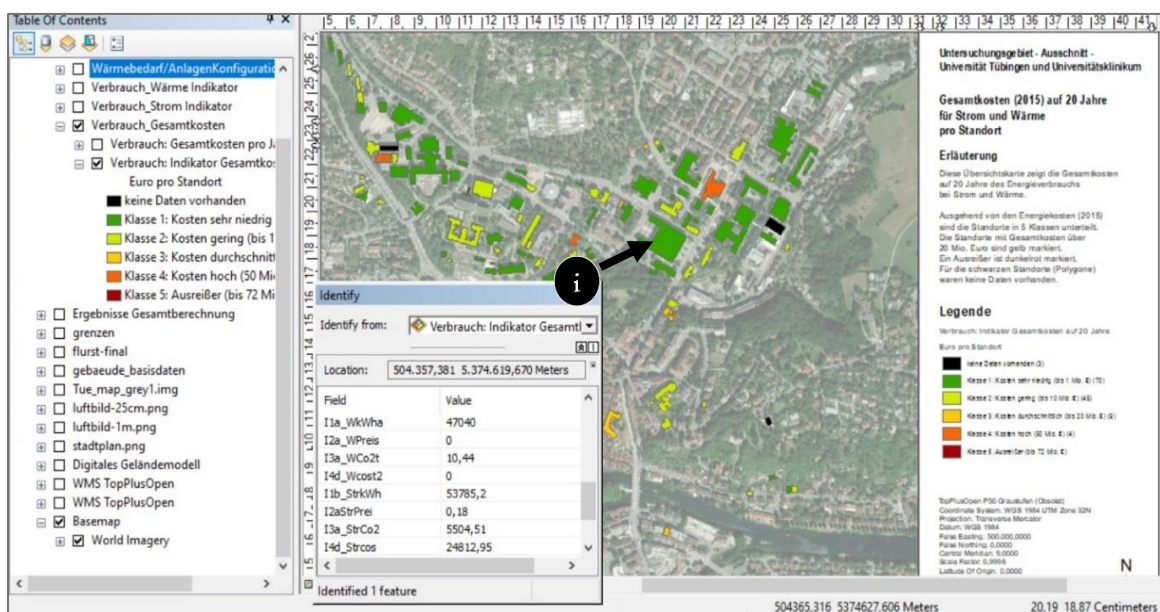


Abb. 69: Ausschnitt aus ArcGIS-Projekt: Abfrage per Infobutton pro Gebäude (eigene Darstellung)

6.1. Bestimmung der Indikatoren für die Flächenbewertung

Mithilfe von vier bestimmten Indikatoren werden die Standorte bewertet und in unterschiedlichen Rangfolgen abgebildet.

- Indikator 1: Energieertrag (Energieertrag in kWh/m² und Jahr) ergibt sich aus den Potenzialwerten und der berechneten Anlagenkonfiguration.
- Der Indikator 2: Preis pro Energieeinheit (Kilowattpreis) ergibt sich aus dem Energieertrag und dem kalkulierten Investitionsvolumen.
- Der Indikator 3: CO₂-Werte berechnet sich aus den Energieerträgen und den CO₂-Äquivalenten. Weiter werden hier die Steuersätze mit den CO₂-Werten kalkuliert.
- Als weitere Indikator 4: Energieverbrauch wurden Strom und Wärmeverbräuche separat festgelegt. Dies ergibt eine Rangfolge nach Verbrauchswerten unabhängig von den Bewertungen nach Indikatoren 1-3.

Die Indikatoren sind in Tabelle 13 aufgelistet.

Tab. 13: Indikatorenset für Standortbewertung (eigene Darstellung)

	Indikator	Beschreibung	Einheit
1	a) Indikator $EP_{\text{Erdwärme}}$	Heizlast Energiepotenzial für Erdwärme in kWh/m ² pro Jahr (für 259 Standorte)	kWh/m² pro Jahr
	b) * Indikator $EP_{\text{PV-Strom}}$	Jahresertrag Energiepotenzial für Strom in kWh/m ² pro Jahr (für 1.311 Teildachflächen)	kWh/m² pro Jahr
2	a) Indikator $Euro_{\text{kWh}}$	Preis pro Energieeinheit (Kilowattpreis) Verhältnis Gesamtkosten (20 J.) zu Gesamtpotenzial (Jahresertrag od. Heizlast 20 J.)	Euro/kWh - auf 20 Jahre
	b) * Indikator $Euro_{\text{m}^2}$	Preis pro Flächeneinheit (Quadratmeterpreis) Gesamtkosten im Verhältnis zur Nutzfläche. Solar: Preis pro m ² (Nutzfläche) Erdwärme: Preis pro Sondenmeter (Erdwärmesonde)	Euro /m² - auf 20 Jahre
3	a) Indikator CO_2/m^2	CO₂ - Werte aus CO₂ - Äquivalenten (GEMIS 4.93) für die Ausweisung von Emission/Reduktion in CO ₂ t/m ² pro Jahr.	CO₂ t/m² pro Jahr
	b) *Indikator $Euro/CO_2$	CO₂ - Kosten in Euro CO ₂ - Steuer - CO ₂ -Schattenpreis aus den CO ₂ -Äquivalenten.	Euro/ CO₂
4	a) Indikator $Verbrauch_{\text{Wärme}}$	Preis pro Energieeinheit (Kilowattpreis) Wärmeverbrauch in kWh/a und Energiekosten/ in 20 Jahren.	Euro/kWh pro Jahr - auf 20 Jahre
	b) * Indikator $Verbrauch_{\text{Strom}}$	Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh) (Kilowattpreis) Stromverbrauch in kWh/a und Energiekosten/ in 20 Jahren.	Euro/kWh pro Jahr - auf 20 Jahre

** Es kann jeweils nach weiteren Indikatoren (b-Varianten) sortiert und bewertet werden.*

6.1.1. Gewichtete Rangfolgenbildung nach Indikatoren

Die Bildung von Rangfolgen nach einzelnen Indikatoren zeigte deutlich, welche Standorte nach ihrem Potenzial auf den ersten Plätzen liegen, jedoch hohe Gesamtkosten aufweisen. Die Prioritätensetzung zeigt sich in der Gewichtung der Indikatoren. Um die Standorte nach dem höchsten Energieertrag, dem geringsten Investitionsvolumen und den geringsten CO₂-Werten zu sortieren, wurde eine Gewichtung der Indikatoren vorgenommen.

- 1) Dabei steht die Gewichtung des Indikators 1a Jahresertrag (kWh/a) mit 60 % für die Priorisierung von Standorten mit der höchsten Energieausbeute. Die Begründung liegt drin, dass ein Austausch fossiler

Brennstoffe angestrebt wird, um die Energiewende anzustreben und die CO₂-Bilanzierung positiv zu beeinflussen.

- 2) An zweiter Stelle steht der finanzielle Aspekt, der sich im Indikator 2a (Kilowattpreis Euro/kWh) gebäudespezifisch ausdrückt und mit 30 % gewichtet ist. Die bestehende finanzielle Ausstattung der Landesregierung für Sanierungsbedarf erfordert die Berücksichtigung wirtschaftlicher Rahmenbedingungen, um die Investition staatlicher Gelder in effiziente Anlagen zu garantieren.
- 3) Den Klimaschutzziele wird besondere Bedeutung beizumessen, indem die CO₂-Werte anstelle von Flächengröße oder Einspeisevergütungen an dritter Stelle priorisiert wird. Die CO₂-Bestimmung steht in enger Abhängigkeit mit dem Jahresertrag und rechtfertigt eine 10 % Gewichtung. Dies ist dem Thema dieser Arbeit geschuldet.

Für die Auswahl der besten Standorte sind die Indikatoren 1a, 2a und 3a berücksichtigt und der Verbrauchsindikator 4a+b separat bewertet. Eine kombinierte Klassifizierung der Datenzeilen erfolgt in 3 Stufen:

- **Indikator 1a - Energieertrag (kWh/m²) 60 %:**
absteigend nach höchstem Jahresertrag (aus Energiepotenzial pro m²).
- **Indikator 2a - Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh) 30 %:**
aufsteigend nach geringstem Kilowattpreis (aus Gesamtkosten und Energieertrag).
- **Indikator 3a - CO₂-Werte (CO₂/m²) 10 %:**
aufsteigend nach geringstem CO₂-Wert (aus Energieertrag und CO₂-Äquivalent).

Tab. 14: Rangfolgenbildung nach Indikatoren (eigene Darstellung)

Indikator 1a	Rangfolge	Indikator 2a	Rangfolge	Indikator 3a	Rangfolge
Höchster Energieertrag (kWh/a) → Niedrigster Wert	Gewichtung 60 % (0,6)	Niedrigster Kilowattpreis (Euro/kWh) → Höchster Preis	Gewichtung 30% (0,3)	Niedrigster CO ₂ -Wert (CO ₂ /kWh) → Höchster Wert	Gewichtung 10% (0,1)



Ranking der besten Standorte:

- nach höchstem Ertrag
- geringsten Kosten im Verhältnis
- geringsten CO₂-Emissionen



„Tübingens next top places for renewables“

Ranking des höchsten Handlungsbedarfs:

- nach höchstem Energieverbrauch
- höchstem Kilowattpreis (nach tba 2015)
- höchste CO₂-Emissionen



„Tübingens worst places“

Finale Datensätze und Gewichtung

Nach der Bereinigung der Datenbank durch aussortieren lückenhafter Datenzeilen (Standorte) reduzierte sich der finale Datensatz für die Endbewertung bei Photovoltaik auf 528 Teildachflächen der Universität und 468 Teildachflächen des Universitätsklinikums. Für Erdwärme blieben 108 Standorte der Universität und 84 Standorte des Universitätsklinikums enthalten.

Tab. 15: Finaler Datensatz für die Bewertung nach gewichteten Indikatoren (eigene Darstellung)

Indikatorenbewertung	Photovoltaik	Erdwärme
Universität Tübingen	528 Teildachflächen	108 Gebäudegrundflächen
Universitätsklinikum	468 Teildachflächen	84 Gebäudegrundflächen
Gesamt	996 Teildachflächen (von 1.311)	192 Gebäudegrundflächen (von 259)

In der Gesamtdatenbank sind weiterhin alle Standorte angelegt und berechnet worden. Ausschließlich für die Bewertung nach Indikatoren sind nur die vollständigen Datenzeilen übernommen.

- Die Gewichtung wurde mithilfe einer absteigenden Sortierung nach Indikator 1b (Jahresertrag und Heizlast) in Form von Rangplätzen zugewiesen (Rangplatz x 0,6= gewichtete Endwert).
- Der Indikator 2a wurde nach aufsteigender Sortierung den Rangplätzen zugewiesen (Rangplatz x 0,30). Da die Preise gleiche Werte aufweisen, werden die direkten Werte und nicht die Nummerierung der Plätze für die Gewichtung genutzt. Sonst würden die Plätze gleichgesetzt werden mit Werten und es gäbe eine Unterscheidung bei selben Werten. Auf diese Weise erhalten die Standorte mit demselben Kilowattpreis auch dieselbe Punktzahl bei der Gewichtung (0,3 Cent/kWh x Gewichtung 0,3= ergibt den Punktestand).
- Bei Indikator 3a (CO₂-Wert: Rangplatz x 0,1) wurde der CO₂ Wert absteigend sortiert, sodass der höchste Wert auf Platz 1 die geringsten Punkte ergibt (Rangplatz x 0,1). Hier konnten die Werte direkt für die Gewichtung genutzt werden.

Dann Summe aller drei Punktevergaben ergibt die Gesamtsumme, bei der der höchste Punktzahl für den bester Standort steht. Die Summe des finalen Endwertes ergibt die **finale Rangfolgenbildung**.

Die Bewertung des Energieverbrauchs nach Indikatoren erfolgte dem umgekehrten Schema:

- 1) Der Indikatoren 4a (Wärmeverbrauch) und der Indikator 4 (Stromverbrauch) wurde jeweils absteigend sortiert und erhielt eine Gewichtung von 60 % zugewiesen (Rangplatz x 0,6). Der höchste Verbrauch ist der schlechteste Standort, der am dringendsten erneuerbare Energien benötigt.
- 2) Der Indikator 2 a (Kilowattpreis von Strom und Wärme) wurde jeweils aus den Energiekosten (tba 2015) berechnet und mit 30 % gewichtet. Der teuerste Kilowattpreis steht für dringenden Handlungsbedarf für die Umstellung auf erneuerbare Energien.
- 3) Der Indikator 3a (spezifische CO₂-Werte aus Strom- und Wärmeverbrauch) wurden absteigend sortiert (höchster Wert= schlechtester Emittent) und mit 10 % gewichtet.

Anhand dieser Rangfolge wird ein Stufenplan für die Erreichung der Klimaschutzziele 2030-2040-2050 abgeleitet und eine Empfehlung für die Nutzung der verfügbaren Flächen abgegeben. Dieser Standortvorschlag wird energetischer Flächennutzungsplan (E-FNP) genannt, durch dessen Umsetzung eine Klimaneutralität – rechnerisch - ausgewiesen werden kann. Das Endergebnis der Flächenbewertung **„Tübingens next Top places for renewables“** ist in tabellarischer Form ausgewiesen. In den Top 20 – Rangfolgen sind die besten Standorte nach den *höchsten Energieertrag*, den *niedrigsten kWh-Preis* und den *geringsten CO₂-Werten* gerankt und im Kartenblatt xxx räumlich dargestellt. Ebenso sind „Tübingens worst Places“ als die Standorte mit dem höchsten Handlungsbedarf aufgrund des Energieverbrauchs ausgewiesen.

Weiterführend kann sortiert und selektiert werden nach Standorten mit einem

- Standorte mit hohem Energiepotenzial und geringem Verbrauch für Einspeisung in das eigene oder öffentliche Netz geeignet sind. ggf. können zusammengehörige Nachbargebäude/Gebäudekomplexe mitversorgt werden.
- Gebäude mit höchsten Verbrauchswerten haben funktions- und nutzungsbedingt herausragende Verbrauchswerte, die mit dem Energiepotenzial überwiegend nicht deckbar sind.

6.2. Simulation des geothermischen Potenzials

Die flächendeckende Potenzialanalyse für oberflächennahe Geothermie erforderte die Simulation des geologischen Schichtenverlaufs bis in die Tiefe der Haßmersheimer Schichten (näheres s. Kapitel Untersuchungsgebiet). Dafür wurden 200 Bohrprofile ausgewertet, die den Schichtenverlauf von der Oberfläche - der Bohransatzhöhe - bis in ca. 200 m Tiefe dokumentieren. In den Dokumenten angegebene Tiefenangaben wurden in Höhenangaben über N.N. umgewandelt und in das digitale Geländemodell (DGM) integriert. Besonders interessant für die Nutzung von Erdwärmesonden sind riskante Schichten wie sulfathaltiges Gestein, Grundwasservorkommen und der Verlauf der Haßmersheimer Schichten ü. NN., die als Trennschicht zwischen Grundwasserstockwerken dienen.

Da die Angaben zu den ober-/untergrenzenden Schichten nicht immer mit dem Liegenden und Hangenden Gestein übereinstimmten, sind Überlappung korrigiert worden. Auf Basis des digitalen DGM wurde mithilfe des *ModelBuilders (ARC Map/ESRI)* zwischen den Schichtgrenzen interpoliert³³. Mit der genauen Simulation des Verlaufs der Gesteinsschichten wurde jeweils die spezifische Wärmeentzugsleistung zugewiesen und bei den Berechnungen des Wärmepotenzials in Watt pro Meter (W/m) berücksichtigt. Dies ergab Potenzialwerte durch folgende Formel³⁴:

Formel Wärmepotenzial in Watt:

Potenzial (W) =	Bohrlänge (m) *	Wärmeentzugsleistung des Gesteins (W/m)
Bohrlänge (m) = Werte aus ISONG-Dokumenten		
Wärmeentzugsleistungen aus VDI-Richtlinie 4640 (Stand 2012, vergl. auch VBI-Leitfaden 2008)		

³³ Näheres zum Rechenvorgang und Simulation der Interpolationsmethode *Ordinary Kriging* ist in Bödinger (2015) nachzulesen.

³⁴ Manton et al. (2012) verändert nach: Agentur für Erneuerbare Energien (2010:34)

In der Potenzialanalyse werden die Energiewerte als **Jahresarbeitszahl (JAZ)** ausgewiesen, die eine Anlagenlaufzeit von 1.800 Betriebsstunden pro Jahr ansetzt. Im Verhältnis von erzeugter Wärmemenge (kWh pro Jahr) und eingesetztem Antriebsstrom (kWh pro Jahr) zeigt sich die Effizienz der Anlage an den Standorten durch die **Jahresarbeit** ³⁵. Die Jahresarbeit hängt von der Wärmeleitfähigkeit (nach VDI-Richtlinie 4640) und der Bohrtiefe ab. Dazu diente die definierte Maximaltiefe für Bohrsonden bis zu den Haßmersheimer Schichten (s. auch unter 6.3.2). Die Leistungsangabe als Jahresarbeit (kWh/a) wurde mit folgender Formel ermittelt:

Formel Jahresarbeit in kWh (pro Jahr)

Jahresarbeit (kWh/a) =	$\frac{\text{Bohrlänge (m)} \times \text{Wärmeentzugsleistung des Gesteins (w/m)} \times 1.800 \text{ h pro Jahr}}{1000}$
Bohrlänge (m) = Werte aus ISONG-Dokumenten Wärmeentzugsleitungen aus VDI-Richtlinie 4640, Stand 2012) Annahme 1.800 Betriebsstunden.	

Die gesetzlich festgelegten Bestimmungen fordern einen Mindestabstand von 10 m zwischen Erdwärmesonden, um das Auskühlen oder Gefrieren des Untergrundes zu vermeiden. Die Menge an nachfließender Erdwärme aus dem Untergrund bestimmt die Wärmeentzugsleistung einer Anlage. Um diesen Einflussfaktor des Wärmenachflusses entsprechend zu berücksichtigen, wurde der *Mindestabstand* von 10 x 10 m in den Rasterkarten einkalkuliert. Jeder Pixel entspricht einem möglichen Erdwärmestandort und weist das Energiepotenzial in Watt pro Jahr (W/a) für eine Sonde in der folgenden Karte aus³⁶. Darauf ist zu sehen, dass in den höheren Lagen im Norden von Tübingen punktuell bis zu 46 MWh/a gewonnen werden kann, während in den Tallagen aufgrund der Tiefenbeschränkungen für Erdwärmebohrungen maximal 18 MWh/a erzielt werden (s. Abb.70):

³⁵ Ergänzend dazu: Für Haushalte gilt, dass mit 1 Einh. eingesetzter Hilfsenergie mind. 3,5 Einh. Wärmeenergie erzeugt wird, um effizient zu sein. Bei größeren Anlagen löst sich das Verhältnis auf (entspricht 75 % Erdwärme + 25 % Fremdenergie (Strom)).

³⁶ Die Einheit der Jahresarbeit in Kilowattstunden pro Jahr (kWh/a) bildet die Grundlage für weitere Berechnungen (Originaldatensatz: als Jahresarbeit in kWh/a als Gesamtwert: Rasterdatei: kwh_a_Gesamtgips.tif).

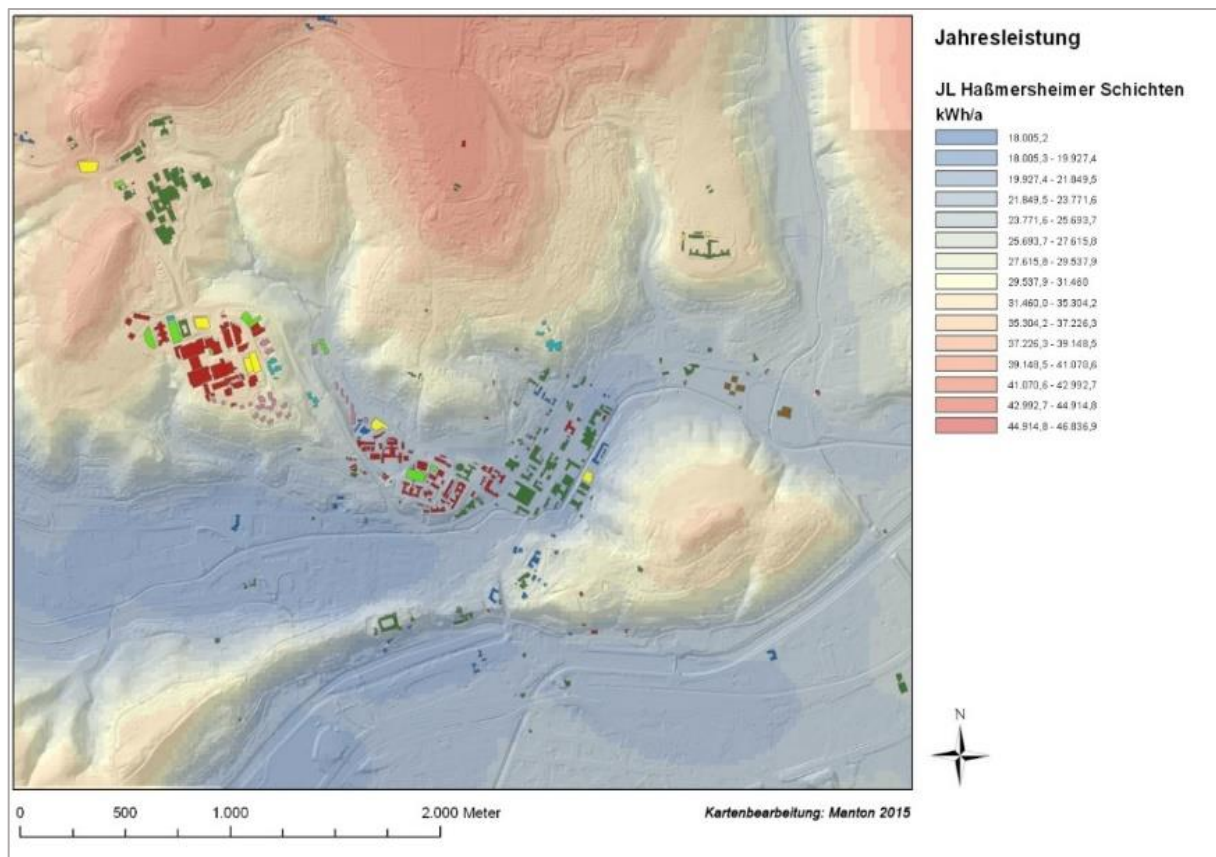


Abb. 70: Das Erdwärmepotenzial in Tübingen als Jahresleistung (Jahresarbeit in kWh/a) Manton 2015.

6.2.1. Extraktion des Erdwärmepotenzials

Mithilfe der Funktion *Zonal Statistics* (ArcGIS/ESRI) sind die Potenzialwerte aus den Rasterkarten extrahiert. Pro Gebäude und auch pro Grundstücksfläche sind punktgenaue Potenzialwerte abgefragt³⁷. Die Berechnung des Erdwärmepotenzials pro Flächeneinheit wurde aus der Anzahl möglicher Erdwärmesonden und ihrem individuellen Erdwärmepotenzial (je nach Ansatzhöhe, max. Bohrtiefe, Schichtmächtigkeit, Wärmeleitfähigkeit des Gesteins) errechnet.

➔ **Erst mit dieser flächenbezogenen Auswertung ist aus der Potenzialanalyse (pro Raster/Pixel) eine flächenbezogener Wärmepotenzialwert ermittelbar.**

Wenn diese Ergebnisse zukünftig für die Gewinnung von Erdwärme herangezogen werden sollten, kann davon ausgegangen werden, dass die Potenziale auf den gesamten Flurstücksflächen höher ausfallen. Die Werte der Simulation Jahresarbeit (kWh/a) fanden Verwendung für folgende statistische Auswertungen:

➔ COUNT: Anzahl der Sonden, die unter Einhaltung der Mindestabstände auf einem Grundstück platziert werden könnten (Pixelauswertung auf Bezugsfläche, Auflösung: 10 x10 m/Pixel).

³⁷ Die vektorbasierte Liegenschaftskarte wurde in eine Rasterdatei umgewandelt, um mit Hilfe der Funktion ArcGIS Toolbox, Version 10.2.2. Spatial Analyst, „Zonal Statistics as Table“ dem Gebäude die Flurstücksnummer des jeweiligen Grundstücks zuzuweisen. Mithilfe der *keycodes* Gebäudenummer (Geb_ID) wurden neue Tabellen angelegt, um statistische Auswertungen für die Flächen zu erstellen.

- SUM: Der Endwert ist der aufaddierte Potenzialwert für die digitalisierte Fläche, der sich aus der Anzahl möglicher Erdwärmesonden auf der untersuchten Fläche (COUNT), mit der zu berücksichtigenden Schichtenfolge (Potenzialsimulation), das Gesamtpotenzial in kWh ergibt (SUM).
- MEAN: Der Mittelwert gibt an, wie hoch das Erdwärmepotenzial im Mittel aller Werte des Grundstücks (MEAN) ausfällt.
- RANGE/ Varianz: Die mittlere quadratische Abweichung, in welcher Variationsbreite sich die Verteilung der Werte zwischen dem Mindestwert (MIN) und dem Maximalwert (MAX) auf der Bezugsfläche verhält.
- MIN/MAX: der Mindest- und Maximalwert pro Fläche als Potenzial (Min – Max)
- STD: Die Standardabweichung ist die Wurzel der Varianz.

Weiter wurde abgewogen, ob zur Gebäudegrundfläche das Flurgrundstück zu untersuchen ist, um ein höheres Wärmepotenzial pro Gebäude ausweisen zu können. Hier sind die Gründe aufgeführt:

- **Die Darstellung des theoretischen Potenzials bestärkt die Notwendigkeit, Erdwärmegewinnung bei der Planung von Neubauten zu berücksichtigen.**
- **Die Realisierung von Erdwärmeeinrichtungen auf bebauten Flächen ist grundsätzlich mit großen Herausforderungen verbunden, weshalb der Potenzialwert für die Gebäudegrundfläche hypothetisch ist.**
- **Der Abzug der Gebäudegrundfläche von der gesamten Flurstücksfläche verringert das Ergebnis der Potenzialanalyse für die Flurstücke und der Gesamtwert bleibt nicht sichtbar.**

6.2.2. Flächendeckende Anlagenkonfiguration für Erdwärmepotenzial

Die flächendeckende Anlagenkonfiguration wurde anhand der Wärmepotenzialanalyse berechnet. Hier ist besonders hervorzuheben, dass das ermittelte Wärmepotenzial zunächst in die Anlagenkonfiguration einfließt. In einer weiteren Berechnung ist die flächendeckende Anlagenkonfiguration anhand des Wärmeenergieverbrauchs kalkuliert, um pro Standort eine Bedarfsdeckung darzustellen. Dafür wurden separate Berechnungen von technischen und wirtschaftlichen Kennzahlen pro Standort durchgeführt, die unter Kap. 6.3.4. + 6.3.11 dargestellt werden und unter den Ergebnissen (Kap. 7.2) aufgeführt sind. Dazu gehören:

- a) Umrechnung des extrahierten Flächenwerts anhand der Bohrsondenanzahl in Wert pro Einzelbohrung (Jahresarbeit (kWh/a).
- b) *Faktor 0,9 % Verteilerverluste* wird abgezogen.
- c) Nutzenergie ist die übrigbleibende Wärme, nach Abzug der Verluste.
- d) Die max. Heizleistung - vergleichsweise auch Brennstoffleistung bezeichnet, wird anhand der Nutzenergie / dividiert durch 1.800 Volllaststunden (Vollbenutzungsstunden) ermittelt. Damit wird die Konfiguration des Wärmekessels berechnet, was in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt wird. Davon ist die Kostenberechnung für die erforderlichen Wärmepumpen abhängig und wird hier gestaffelt angewendet.

- e) Die elektrische Antriebsleistung ist die Menge an Strom, die für die Gewinnung der Wärmemenge benötigt wird, unter Berücksichtigung der 1.800 Betriebsstunden pro Jahr.
- f) Die gesamte Entzugsleistung pro Jahr und die spezifische Entzugsleistung pro Sondenmeter sind anhand der Heizlast bestimmt.
- g) Die erforderliche Sondenlänge zur Deckung des Wärmebedarfs und die Sondenlänge pro Erdsonde zeigen die Auslegung der Wärmepumpen und der baulichen Kosten an.

Weitere Kennzahlen können anhand des gewählten Wärmepumpen-Modells in Festgestein beispielhaft berechnet werden (s. Abb.71).



Hersteller Viessmann		
Modell: Sole/Wasser-Großwärmepumpe		
Vitocal 350-G Pro mit Vorlauftemperatur bis 73 °C		
20,6 kW, Typ AWHI 351.A20, Innen		
Artikelnummer:	Z009870	Faktor
Nenn-Wärmeleistung / Heizleistung	27,2 kW	Bis 197 kW
Leistungszahl (COP) nach EN 14511	4,4	Sole 0°C Wasser 35 °C
Kälteleistung (angenommener Wert)	29,7	kW
Jahreszahl (angenommen)	4	

Abb. 71: Vitocal 350-G-Pro Wärmepumpe (VIESSMANN 2018)

6.2.3. Flächendeckende Anlagenkonfiguration für den Wärmeendenergieverbrauch

Die Berechnung der flächendeckenden Anlagenkonfiguration für alle untersuchten Standorte ergibt sich aus dem Wärmeendenergieverbrauch (2015 tba), der durch verschiedene Energiemedien (Heizöl, Erdgas, Fernwärme) gedeckt wird. Die Ermittlung der zu gewinnenden Erdwärmemenge für die Bedarfsdeckung – *ist als theoretisches Erdwärmepotenzial* - anzusehen. Mithilfe dieser flächendeckenden Anlagenkonfiguration wird der Deckungsgrad für Wärme erstellt. Die entsprechenden Berechnungen sind hier aufgeführt.

6.2.4. Ermittlung des nutzbaren Energiepotenzials (Nutzenergie)

Dieser Verbrauchswert (tba 2015) wird hier als Heizwärmebedarf angenommen. So stellt der Wert des Wärmeverbrauchs eines Jahres hier die erforderliche Wärme dar, die gedeckt werden soll. Allerdings ist für eine genaue Bestimmung zunächst ein Verlustfaktor von 0,9 % zu berücksichtigen und separat ausgewiesen, der vom **Gesamtendenergieverbrauch (Heizlast)** abgezogen wird. Daraus ergibt sich die Nutzenergie, der sogenannte **Netto-Wärmeverbrauch**. Dies ist die Wärme, die als solche im Gebäude ankommt. Die Höhe des Verlustes wird separat in der Tabelle ausgewiesen.

Formel: Nutzenergie (Netto-Wärmeverbrauch (kWh))

$\text{Nutzenergie (kWh)} \\ \text{Netto-Wärmeverbrauch} =$	$\text{Gesamt-Endenergie-Verbrauch} \\ \text{(kWh/a)}$	$\times \text{Faktor } 0,9\% \\ \text{(Verteilerverluste)}$
---	--	---

6.2.5. Ermittlung der maximalen Heizleistung

Mit der Berechnung der Nutzenergie, kann die **maximale Heizleistung (kW)** bestimmt werden und sagt im übertragenen Sinn aus, welche Leistung die Wärmepumpe – bei Bedarf z.B. am kältesten Tag im Jahr - maximal erbringen kann. Vergleichbar mit der Pferdestärke (PS) eines Fahrzeugs gibt die maximale Heizleistung hier die Power an, nach der die Wärmekesselkonfiguration auszurichten ist. Diese würde allerdings Daten zu den Heizungsanlagen erfordern und wird hier nicht weiter berechnet.

Die maximale Heizleistung einer Wärmepumpe wird ebenfalls anhand des jährlichen Verbrauchs (kWh/a) berechnet. Damit wird hier vorausgesetzt, dass der Wärmebedarf nicht nur teilweise sondern zu 100 % aus Erdwärme gedeckt wird. Für die **maximale Heizleistung** wird der Wärmeverbrauch durch die Entzugsleistung (1800 h) einer Wärmepumpe dividiert, um die maximal mögliche Wärme in Kilowatt zu berechnen.

Formel: Maximale Heizleistung P_H (kW)

$\text{Heizleistung } P_H \text{ (kW)} =$	$\frac{\text{Wärmeendenergieverbrauch (in kWh)}}{\text{Entzugsleistung (1800 h)}}$
---	--

6.2.6. Festlegen der Jahresarbeitszahl (JAZ) und Leistungszahl (COP)

Die **Jahresarbeitszahl (JAZ)** ist die eine technische Angabe für die Effizienz einer Wärmepumpe und stellt den Wirkungsgrad in der Praxis dar. Sie gibt das Verhältnis von eingesetzter Energie und erzeugter thermischer Energie über das Jahr an und berücksichtigt dabei die Rahmenbedingungen eines Gebäudes. Eine Jahresarbeitszahl unter 3 wird als unwirtschaftlich eingestuft. Schwache Wärmepumpen erzielen eine Jahresarbeitszahl von 3,5; sehr gute erreichen Werte über 4,5. Das gewählte Model weist eine Jahresarbeitszahl von 4 auf und hat damit einen guten übertragbaren Wert³⁸. → **Jahresarbeitszahl = 4**

Die **Leistungszahl (COP)** geht ebenfalls aus den technischen Angaben des Modells hervor. Moderne Wärmepumpen können bereits höhere Leistungszahlen erreichen. Es wird eine Leistungszahl von 4,0 festgelegt (siehe gewähltes Model). Mit einer geringeren Leistungszahl wird automatisch ein Verlust mitberücksichtigt. → **Leistungszahl = 4**.

Auch hier können in einer flächendeckenden Berechnung nicht alle Faktoren vollständig berücksichtigt werden wie beispielsweise Temperaturdifferenzen zwischen Gebäudeaußenwänden, Temperaturabfall

³⁸(BWP 2021): Berechnung mit JAZ-Rechner abzüglich 15 % (Schätzwert) ist realistisch (kWh Wärme/ JAZ= kWh Strom).

zwischen Verdampfer und Verflüssiger auf das Heizungswasser und auch nicht die Vorlauftemperatur einer Wärmepumpe, die beim gewählten Modell bis 73°C beträgt.

6.2.7. Auslegung des Erdsondenfeldes

Mit Bestimmung der maximalen Heizleistung wird die Auslegung des Erdsondenfeldes weiter bestimmt. Dazu gehört die Berechnung der erforderlichen Sondenlänge, die benötigt wird, um den Wärmebedarf zu entziehen. Weiter wird die Anzahl der Erdwärmesonden, die Sondenlänge und der erforderliche Antriebsstrom zum Antrieb der Wärmepumpe ermittelt:

a) Berechnung des erforderlichen elektrischen Antriebsstroms (kWh/a)

Mit der angegebenen *Leistungszahl* (4) und der *maximalen Heizleistung* (kW = Wärmeverbrauch gesamt kWha/1800h) wird der erforderliche *elektrische Antriebsstrom* (kW) berechnet. Dabei kann von folgendem Verhältnis ausgegangen werden: 1/3 elektrischer Antriebsstrom und 2/3 Entzugsleistung, ergeben die max. Heizleistung.

Formel elektrischer Antriebsstrom:

Elektrischer Antriebsstrom (kWh)	max. Heizleistung (kW)	x 1.800 h
(Jahresbedarf) =	Leistungszahl (COP= 4,0)	

Die Strommenge des Antriebsstroms wird mit dem aktuell geltenden Strompreis für Ökostrom des Landes Baden-Württembergs berechnet. Dieser liegt bei 0,3091 Cent pro Kilowattstunde und wird weiter steigen. Eine Grundgebühr bzw. Grundpreis wird nicht berücksichtigt.

Formel Kosten Antriebsstrom:

Gesamtstromkosten der Anlage=	<i>Elektrischer Antriebsstrom</i> (kWh)	x 0,3091 Euro/kWh
----------------------------------	--	-------------------

b) Ermittlung der spezifischen Entzugsleistung

Die *spezifische Entzugsleistung* ist im Gegensatz zur *spezifischen Wärmeleitfähigkeit* von vielen Faktoren des Untergrundes anhängig. Hinzu kommen die technischen Größen der Erdwärmesondenanlage (Anzahl der Betriebsstunden, der Bohrlochgröße, der Wärmeleitfähigkeit der Verpressung). Es gibt zwei Rechenwege, um die spezifische Entzugsleistung zu ermitteln:

1. Spez. Entzugsleistung P_E über max. Heizleistung und Leistungszahl (4,0)

Da hier ausschließlich der Wärmebedarf herangezogen wird (kein Warmwasserverbrauch), wurden 1.800 Betriebsstunden pro Jahr (h/a) angesetzt. Die Entzugsleistung P_E errechnet sich aus der nötigen Heizleistung P_H und der Leistungszahl der Wärmepumpe.

Formel: spez. Entzugsleistung P_E über die max. Heizleistung und die Leistungszahl (4,0)

Spez. Entzugsleistung $P_E (W/m) =$	max. Heizleistung (kWh/a/1800h) x	$\frac{(1-1)}{\text{Leistungszahl (COP= 4,0)}}$
$P_E = P_H * (1-1/COP)$ Entzugsleistung (W/m) = P_E Heizleistung = P_H		

2. Spez. Entzugsleistung über jährlichen Wärmebedarf und Jahresarbeitszahl (4,0)

Aus dem **jährlichen Wärmebedarf** und der **Jahresarbeitszahl** (JAZ) der Wärmepumpe lässt sich ebenfalls die Entzugsleistung berechnen:

Formel: spez. Entzugsleistung P_E über den jährl Wärmebedarf und die Jahresarbeitszahl (4,0)

Spez. Entzugsleistung $P_E (W/m) =$	$\frac{\text{Wärmebedarf (kWh/a)} \times (1-1)}{\text{Jahresarbeit 4 (JAZ)}}$
--	---

c) Bestimmung der Sondenlänge nach Wärmepotenzial und -bedarf

Die Bestimmung der Sondenlänge wurde in der Potenzialanalyse bereits mit der Simulation der Hassmersheimer Schichten berechnet. Darin wurde durch die Simulation des Schichtenverlaufs und der maximalen Bohrtiefe bis zu den Haßmersheimer Schichten bereits eine maximale Bohrlänge berücksichtigt. So gehen alle Potenzialwerte von dieser maximalen Bohrtiefe aus. Die Ermittlung der Sondenlänge anhand des Wärmeendenergieverbrauchs errechnet sich anhand derselben technischen Parameter³⁹. Die Bestimmung der erforderlichen Sondenlänge für die Deckung des Wärmebedarfs erfolgt über die angenommene *spezifische Entzugsenergie* von 50 kWh pro Meter Bohrsonde (kWh/m)⁴⁰.

Formel Sondenlänge 1:

Sondenlänge $M_s(m) =$	$\frac{\text{Verdampferleistung der Wärmepumpe (W)}}{\text{spez. Entzugsleistung (W/m)}}$
(Verdampferleistung: Heizbedarf/1.800 h)	

Formel Sondenlänge 2:

Sondenlänge pro Erdwärmesonde=	$\frac{\text{Gesamtsondenlänge (m)}}{\text{Anzahl der Erdsonden}}$
---------------------------------------	--

³⁹ Zwar wurde die maximal mögliche Bohrtiefe bis zu den Haßmersheimer Schichten in der Potenzialanalyse ermittelt, ist jedoch nicht im Raster als Wert hinterlegt und abrufbar. Deshalb wurde die funktion Extraction by mask für die Gebäudegrundfläche angewendet.

⁴⁰ (Viessmann 2022): realistischer Wert aus der Praxis ist 50 Watt/m spezifische Entzugsleistung. Auskunft von Hr. Weinmann, Fachbetriebsleiter Viessmann Wärmepumpen, Region BW.

6.2.8. Kalkulation der Anfangsinvestition für Erdwärme

Die Kosten eines Erdwärmesondenfeldes setzt sich aus den Anschaffungs- und Betriebskosten zusammen. Charakteristisch ist, dass im Vergleich zu Gas- oder Ölheizungen die Anschaffungskosten deutlich höher und die Betriebskosten - insbesondere Stromkosten - deutlich niedriger sind. In der Praxis wird von einem Kostenfaktor von ca. 100 Euro pro gebohrten Meter ausgegangen. Insbesondere in Süddeutschland liegt dieser Wert hoch, während in Norddeutschland der Kostenfaktor bei ca. 50-75 €/m liegt. Für die Standorte im Untersuchungsgebiet in Tübingen ist daher von einem höheren Bohrkostenfaktor auszugehen (Heizungsfinder 2021; Viessmann 2021).

Um diesen zu ermitteln, wurden Preisangebote eines lokalen Unternehmens eingeholt und die Aufwendungen für Anfangsinvestitionen für fünf Anlagengrößen aufgestellt. Damit werden eigene Kostenkalkulationen dem Kostenfaktor 100 €/m gegenübergestellt (s. Ergebnis: Preis pro Sondenmeter). Mit dem ermittelten Kostenfaktor wird anschließend der **Preis pro Energieeinheit (€/kWh)** bestimmt, der die Standortbewertung herangezogen wird. Anhand der Gesamtkosten konnte für jede Anlagengröße ein Kostenfaktor in Euro pro Sondenlänge abgeleitet werden ⁴¹.

Bei geothermischen Anlagen stellen die Bohrkosten inklusive der Erdwärmesonden den größten Anteil an den Investitionskosten dar. Beim Errichten einer Erdwärmesondenanlage wird zwischen der fachlichen Begutachtung und Beaufsichtigung während des Bohrprozesses, der baulichen Ausführung durch Maschinen und den Materialkosten unterschieden. Die Kosten für Bohrungen und Sondenverlegung hängen direkt von der Sondenanzahl und der Gesamtsondenlänge ab und können mit festen Kostenfaktoren pro Einheit berechnet werden. Die eingeholten Preisangebote wurden nach unterschiedlichen Bohrlängen und unterschiedlicher Gesamtsondenlänge aufgestellt⁴². Um die Kostenfaktoren flächendeckend zuzuordnen, wurde zwischen den Werten interpoliert. Da die Potenzialanalyse in dieser Arbeit die Potenzialangaben bis zum Schichtenverlauf der Haßmersheimer Schichten beinhaltet, wurde für die Berechnung der Kosten eine separate Bestimmung der benötigten Sondenlänge erforderlich. Anhand dieser Gesamtsondenlänge, die theoretisch für die Deckung des Wärmebedarfs erforderlich ist, wurden die Kostenkalkulationen erstellt. Die Kosten hängen auch von der Tiefe und dem anstehenden Gestein ab. Weiter werden die Kosten pro Einzelsonde ausgewiesen, indem wie bereits beschrieben, die Gesamtsondenlänge durch die Anzahl der möglichen Sonden (COUNT) dividiert wird.

Formel Gesamtsondenlänge

Kosten für Bohrung in Euro _{ges}	= Gesamtsondenlänge in m	x	100 €/m*
*Kostenfaktor 100 Euro/m pro Sondenmeter			

Zu den baulichen Begleitmaßnahmen zählt das Abtragen des Bodenmaterials, die Entsorgung des Schlammes und verschiedene Füllungen bis hin zur Abdichtung und Versiegelung im Gelände und Gebäude. Sie verursachen je nach Anlagengröße variierende Kosten. Dahingegen sind die Aufwendungen für die fachliche

⁴¹ (Sierig 2018): zu Grunde gelegte Kostenvoranschläge der Firma RUOFF, Reutlingen sind im Anhang hinterlegt.

⁴² s. Anhang: Interpolation der Kosten für Erdwärmesonden, gestaffelte und interpolierte Preise

Begutachtung und Kontrolle durch geologische und technische Fachkräfte mit festen Honorarsätzen belegt für:

- a) geologische fachliche Beaufsichtigung und Befüllung
- b) bauliche Ausführungen, Maschinenarbeiten und Materialkosten
- c) Kostenfaktor für Wärmepumpe (Anzahl) und Antriebsstrom (kWh/a)
- d) Weitere Kostenfaktoren

Anschließend werden die gewählten Kostenpauschalen pro Anlagengröße, Fläche und baulichem Aufwand zugewiesen:

Tab. 16: Auflistung der abgeleiteten Kostenfaktoren (eigene Darstellung)

Geologisch-fachliche Begutachtung und Aufsicht	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrsonden: 90 Euro pro Sonde • Geologische Bemessung: interpolierte Preise • Bohrkosten pro Meter/ Gesamtlänge: 52,96 Euro/m
Bauliche Ausführungen, Maschinenarbeiten und Materialkosten	<ul style="list-style-type: none"> • Interpolierte Kosten⁴³ • Entsorgung und Schlamm-mulden nach Volumen m³ • Verbindungsleitung, für Bagger und Grabenarbeiten und für Entsorgung
Wärmepumpe und Antrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten der Wärmepumpe (laut Viessmann Kostenvoranschläge⁴⁴) • Antriebsstrom
Weitere Kosten	<ul style="list-style-type: none"> • Für Anfahrt (interpoliert nach Aufwand) • Versicherung

a) **Kostenfaktor für geologisch-fachliche Begutachtung und Aufsicht**

Die Anlagen werden nach ihrer maximal möglichen Anzahl an Bohrsonden klassifiziert. Die Kosten für eine geologische Begutachtung und bauliche Aufsicht während der Bohrung setzen sich aus der geologischen Begutachtung, Bemessung und Überwachung zusammen. Diese werden mit festen Sätzen kalkuliert und können flächendeckend angewendet werden:

- Die **geologische Überwachung** und Verfüllung: 90 Euro pro Erdwärmebohrung.
- Die **geologische Bemessung** bei Sonden tiefer 50 m, mit Bohranzeige bei Behörden liegt bei 1.350,00 €. Die Kosten werden zwischen den angegebenen Kostenfaktoren interpoliert, abhängig von Anzahl und Länge pro Untersuchungseinheit zugewiesen.
- **Erdwärmebohrung pro Tiefenmeter**: 52,96 Euro pro Meter Bohrung gibt die Kosten für die Gesamtsondenlänge an, die laut Berechnung für die Deckung des Wärmebedarfs benötigt wird.

b) **Kostenfaktor für bauliche Ausführungen, Maschinenarbeiten und Materialkosten**

Die Aufwendungen für bauliche Arbeiten, die im Zusammenhang mit der Entfernung von Erdmaterial für Verbindungsleitungen zum Gebäude, der Befüllung von Gräben und der Entsorgung von Aushubmaterial anfallen, werden nach Menge unterteilt und den Standorten in Abhängigkeit von der Bohrlänge zugeordnet. Nur durch gestaffelte Kosten nach Anlagengröße ist eine verlässliche Kalkulation möglich. Dazu gehören auch

⁴³ (Sierig 2018): zu Grunde gelegte Kostenvoranschläge der Firma RUOFF, Reutlingen sind im Anhang hinterlegt.

⁴⁴ (VIESSMANN 2022) Kostenvoranschläge von VIESSMANN Wärmepumpen, Baden-Württemberg.

die **Arbeiten mit Maschinen z.b. Baggerarbeiten, die ja nach Standort** von der Länge des benötigten Leitungsgrabens abhängen.

- Die **Verbindungsleitung** zwischen Erdwärmesonde und dem Heizsystem im Gebäude variiert in der Anzahl der Hauseinführungen, Kernbohrungen und Anbindungen. Es fallen Zulagen an.
- **Maschinelle Arbeiten** wie z.b. Verbindungs- u. Leitungsgraben, Einsanden, Rückverfüllung.
- **Die Entsorgungskosten für 7 m³ Schlammmulde** liegen bei 850,00 Euro für Entsorgung des Erdmaterials. Die Kosten werden nach Kubikmeter in Abhängigkeit zur Bohrlänge interpoliert oder gestaffelt den Standorten zugewiesen⁴⁵.

Im selben Verhältnis wie die Zuweisung der **Kosten für Entsorgung** verhält es sich bei der Kalkulation der Kosten für das Graben des Verbindungsgrabens, dem Abtransport. Die Preisangebote zeigen auf, dass sich der Gesamtkostenfaktor auf 90-120 % der Kosten für die Schlamm-mulden Entsorgung beläuft. So kann davon ausgegangen werden, dass sich die Kosten hier auf 120 % des gestaffelten Kostenfaktors für dieselben Volumenklassen belaufen (s. Beschreibung im Anhang).

c) Kostenfaktor für Wärmepumpe und Antriebsstrom

Die Kosten für Wärmepumpen und erforderlichen Antriebsstrom werden als separate Posten aufgeführt. Diese hängen vom Produkt- und Strompreis ab. Die Preise für die Modell-Wärmepumpe hat folgende Anschaffungspreise:

Tab. 17: Preisliste der Wärmepumpen nach Leistung (Viessmann 2018)

Modell Vitocal 350-G Pro - Sole/Wasser-Großwärmepumpe mit Vorlauftemperatur bis 73 °C, 20,6 kW, Typ AWHI 351.A20, Innen. Firmenpreisliste 10.339, - Euro.⁴⁶					
Wärmepumpenleistung	Preis WP	Preis Pufferspeicher	Preis Zubehör Preis Pumpen		Summe
10 kW	12.500,00	1.700,00	1.000,00	3.000,00	18.200,00
50 kW	24.000,00	2.500,00	1.500,00	6.000,00	34.000,00
90 kW	37.000,00	4.000,00	2.500,00	9.000,00	52.500,00
140 kW	49.000,00	6.500,00	2.500,00	13.000,00	71.000,00
220 kW	72.000,00	8.000,00	2.500,00	15.000,00	97.500,00
Ab 1000 kW	-	-	-	-	350.000,00
Ab 2000 kWh	-	-	-	-	550.000,00

- **Antriebsstrom für die Wärmepumpe (s. vorne):** Elektrische Antriebsleistung (kW) (Antriebsstrom) x 0,3091 Euro/kWh = Antriebsstrom in Euro wird den Betriebskosten zugerechnet. Diese Kennzahl ist für die Kostenberechnung des Antriebsstroms notwendig⁴⁷.
- **Nach den aktuell steigenden Strompreisen können die Parameter angepasst werden (ca. 0,39 c/kWh)**

⁴⁵ (Sierig 2018): zu Grunde gelegte Kostenvoranschläge der Firma RUOFF, Reutlingen sind im Anhang hinterlegt. ⁴⁵ Eigens abgeleitete Angaben für Anlagen mit 8x7m³ Schlamm-mulde.

⁴⁶ (Viessmann 2022): Produktanfrage bei Fachberater Hr. Weinmann, Viessmann Baden-Württemberg.

⁴⁷ (Viessmann 2022): In der Praxis geht man von 1/3 elektr. Antriebsstrom und 2/3 Entzugsleistung aus, die die max. Heizleistung ergeben. Auskunft von Hr. Weinmann, Fachbetriebsleiter Viessmann Wärmepumpen, Region BW.

Weitere Kosten fallen durch Anfahrts-, Versicherungs- und nicht definierte Zusatzkosten an:

- Die **Anfahrtskosten** werden nach Entfernung und **Aufwand für Anlieferung** gestaffelt kalkuliert. Die **An- und Abfahrtskosten** werden mit einem Mindestpreis von 1.200 Euro bis 50 km und Baustelleneinrichtung angesetzt und dann mit zunehmender Entfernung angepasst.

Die Betriebskosten einer Erdwärmesonde mit Wärmepumpe ergeben sich aus den aufgeführten Aufwendungen und dem Antriebsstrom (s. Tab.16). Darin sind die laufenden Kosten in einem Betriebsjahr aufgeführt, die nach Errichtung der Anlage in den ersten Betriebsjahren gering ausfallen. Für die Ableitung eines Kostenfaktors für die Betriebskosten wurden die Kostenvoranschläge eingeholt und nach Anlagengrößen aufgelistet, zwischen unterschiedlichen Betriebsgrößen wurde interpoliert. Mithilfe der Klassifizierung nach Installierter Leistung konnten für die jeweiligen Anlagengrößen angepasste Faktoren abgeleitet werden (s. Anhang). Die folgende Tabelle zeigt die Kostenfaktoren:

Tab. 18: Betriebskosten bestehend aus jährlichen Kosten (eigene Darstellung)

Betriebskosten und laufende Kosten nach Anlagengröße Heizleistung		100 m Bohrlänge 8 Sonden	200 m Bohrlänge 12 Sonden	400 m Bohrlänge 16 Sonden	700 m Bohrlänge 18 Sonden	1000 m Bohrlänge 20 Sonden
	Aufwendung	Euro	Euro	Euro	Euro	Euro
1.	Weitere Leistungen (Anmeldung bei Netzbetreiber, Umbaukosten, Zählerinstallation)	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
	Zertifizierung Mittelspannung	330,00	550,00	770,00	990,00*	4.140,00
3.	Wartung und Pflege/ Reinigung (Instandhaltung, Wartung Speicher und PV-Anlage, Störungsbeseitigung)	255,00	930,00	950,00	1.406,00*	2.000,0
4.	Sensor-Webbasiertes Monitoringsystem	276,00	276,00	276,00	276,00	276,00
5.	Inbetriebnahme (Montage Direktvermarktungsbox etc.)	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
	Betriebskosten Gesamt (Jährlich) in Euro	1.181,00	2.076,00	2.316,00	2.992,00	6.736,00
	Betriebskosten auf 20 Jahre in Euro	23.620,00	41.520,00	46.320,00	59.840,00	134.720,00
*interpolierte Kosten						

Weitere laufende Kosten

Der Antriebsstrom ist nach der Heizleistung berechnet und separat in der Berechnungstabelle ausgewiesen. Die Berechnung der anfallenden Kosten für den Antriebsstrom einer Wärmepumpe wird mithilfe des geltenden Strompreises des Jahres 2022 erstellt. Der Bundesverband für Energie- und Wasserwirtschaft legte den aktuellen Strompreis für das Jahr 2022 auf 31,96 Cent/kWh fest (BDEW 2022). Dieser Wert berücksichtigt die reduzierte Mehrwertsteuer von 16 % und gilt für Industrieverbraucher mit einem Jahresverbrauch von

160.000 -20. Mio. kWh. Für die Berechnungen der Antriebsstromkosten wird der Strompreis auf 31 Cent/kWh festgelegt, da davon ausgegangen wird, dass eine kWh Ökostrom des Landes Baden-Württembergs zu einem reduzierten Wärmepumpentarif abgerechnet wird.

Formel: Kostenfaktor Antriebsstrom

Kostenfaktor für Antriebsstrom €/kWh _{el} =	Berechneter Antriebsstrom (kWh/a)	x Strompreis 31 Cent/kWh
--	-----------------------------------	--------------------------

Die Versicherungskosten werden pauschal mit einem Betrag von 320,00 Euro einkalkuliert. Bei besonders großen Anlagen sind detaillierte Angebote für Versicherungen einzuholen. Allerdings ist davon auszugehen, dass sie bei großen Anlagen exorbitant ansteigen, da die Risiken in gebautem Gebiet sehr hoch sind. Hier wurde keine Staffelung eingeteilt.

6.2.9. Die Gesamtkosten (€/a) und Preis pro Energieeinheit (€/kWh)

Die Ausweisung der **Anfangsinvestitionen** und der **Betriebskosten im ersten Jahr werden zu den Gesamtkosten im ersten Jahr** und den **Gesamtkosten auf 20 Jahre** aufaddiert. Die untersuchten Flächen ergeben mit dem hochgerechneten Wärmepotenzial in kWh auf 20 Jahre den durchschnittlichen **Preis pro Energieeinheit** (Kilowattpreis Euro/kWh) für jeden Standort.

Formel: Gesamtkosten auf 20 Jahre

Gesamtkosten (auf 20 Jahre) =	Anfangsinvestitionen	+ Betriebskosten (20 Jahre)
-------------------------------	----------------------	-----------------------------

Weiter wird ein Preis pro Sondenmeter in **Euro/m** ausgewiesen, der ebenfalls mit anderen Standorten vergleichbar ist. Daraufhin wird der Vergleich des Energiepotenzials mit dem Gesamt-Wärmeendenergieverbrauch relevant, um aufzuzeigen ob der Wärmebedarf durch das Energiepotenzial (pro Grundfläche) deckbar wäre (s. 7.2.2+7.2.3.).

Mit Hilfe der Gesamtkosten (€/a) und des Energiebedarfs (kWh/a), wird ein Flächenwert pro Energieeinheit (Euro/kWh) ermittelt.

Formel: Kosten pro Energieeinheit Euro/kWh

Kosten pro Energieeinheit (Euro pro kWh) =	Gesamtkosten in Euro (auf 20 Jahre) / Wärmeverbrauch in kWh (auf 20 Jahre)
--	---

Formel: Preis pro Sondenmeter (Euro/m)

Preis pro Sondenmeter (€/m ²) =	Gesamtjahreskosten in Euro / Benötigte Gesamtsondenlänge in m ²
---	---

6.2.10. Ermittlung der Einnahmen durch Erdwärme

Erdwärmebohrungen sind eine einfache und zuverlässige Methode, um eine Wärmepumpe einzusetzen. In der flächendeckenden Auswertung wird jeweils die Gebäudegrundfläche auf sein Erdwärmepotenzial untersucht. Eine Realisierung unterhalb eines bestehenden Gebäudes erscheint jedoch sehr unwahrscheinlich. Dennoch ist eine Erdwärmesonde eine punktuelle Installation, für die nicht das gesamte Grundstück umgegraben werden muss, wie es bei der Verlegung von Erdwärmekollektoren notwendig ist. Auch die Entzugsleistung ist höher, wenn auch die Kosten für eine Bohrung intensiver sind. Da eine Realisierung auf bebauten Grundstücken sehr unwahrscheinlich ist, stellen die hier aufgestellten Anfangsinvestitionen einen Richtwert dar. Nach dem Erneuerbaren Energie Gesetz wird keine Einspeisevergütung für Wärme aus Geothermie bewilligt. Allerdings für Strom aus Geothermie gilt derzeit ein Vergütungssatz von 25,2 Cent/kWh (EEG-Wärme 2009). Da hier aber nicht von Stromgewinnung durch Erdwärme ausgegangen wird, entfällt diese Berechnung ebenfalls.

Für die Einspeisung von Erdwärme in das lokale Fernwärmenetz können lokale Einspeisevergütungen gelten. Für die meisten kombinierten Geothermieanlagen (Strom- und Wärmegewinnung) wird die Anfangsinvestition über das EEG refinanziert, wodurch finanzielle Rückflüsse generiert werden können. Durch die kombinierte Nutzung könnten auch jene Wärmeprojekte realisiert werden, deren Finanzierung sonst nicht gesichert gewesen wäre.

6.3. Simulation des solarenergetischen Potenzials

Die Digitalisierung des neuen Lageplanes aller Universitätsgebäude wurde auf Grundlage des abgeleiteten Oberflächenmodells durchgeführt. Die Dachstruktur wurde als Gesamtfläche und in Teildachflächen erfasst, um verschiedene Flächenberechnungen durchführen und Gesamtwerte pro Gebäude ausweisen zu können. Ein Dach besteht aus mehreren Polygonen von Teildachflächen, die zusammengesetzt die gesamte Dachfläche abdecken. Spezifische Objekte, wie Dachfenster, Gaubendächer und Schornsteine bleiben unberücksichtigt. Ebenso kann die Ertragsmenge pro Gesamtdachfläche abgefragt werden (Manton et al. 2012, Manton et al. 2016).

6.3.1. Berechnung des Strompotenzials aus Photovoltaik

Die Extraktion der Potenzialwerte pro Teildachfläche aus den Rasterdateien wurde unter Kap. 6.2.3. beschrieben. Für die Einschätzung der Genauigkeit dieser Polygon-bezogenen Einstrahlungswerte ist zu erwähnen, dass die Polygone anhand eines Satellitenbildes digitalisiert wurden. Dies birgt eine Verzerrung in sich, da die Dachschräge bei der Flächenbestimmung nicht mit einkalkuliert wurde und somit ein Flächenabzug entstand, der bei einer dreidimensionalen Digitalisierung vermieden worden wäre.

Der ermittelte Potenzialwert pro Polygon ergibt sich aus der Sonneneinstrahlung pro Pixel, der pro Dachflächenpolygon erfasst und zu einem Wert pro m^2 aufsummiert wurde. Aus der Simulation des Solarpotenzials ergingen jeweils Werte für diffuse und direkte Einstrahlung. Diese Werte wurden für die Berechnungen in dieser Arbeit zu einem Wert (Gesamteinstrahlung pro Teildachfläche kWh/ m^2/a) addiert.

Im Gegensatz zu den Exceltabellen sind die Werte hier nicht Dachflächengenau, sondern Pixelgenau und vom SAGA-Format. sgrd in das *.tif-Format umgewandelt worden. Damit die Monats- und Jahresmittelwerte auch im Rasterformat verfügbar werden, sind alle Tagesraster eines Monats zu einem Monatssummenraster aufsummiert. Diese wiederum wurden zu Jahressummenraster aufsummiert.

Die Umrechnung des Durchschnittswertes kWh/m²/a wurde auf die nutzbare Teildachfläche umgerechnet. Um für weiterführende Berechnungen einen Stromertragswert zu ermitteln, wurden zunächst 1/3 der Dachflächen abgezogen, da erfahrungsgemäß durchschnittlich nur 2/3 der Dachfläche für die Installation einer Photovoltaikanlage nutzbar ist. Gründe hierfür sind die vorgeschriebenen Mindestabstände von 50 cm zum Dachrand und Flächenverluste durch Verkabelungen, Fenster und Gauben. Deshalb werden maximal 66 % der digitalisierten Dachfläche als potenziell nutzbare Fläche bestimmt (Photovoltaik 2018, Photovoltaik 2021).

→ Für jede Teildachfläche ergibt sich ein Flächenwerte.

Formel: nutzbare Dachfläche

Gesamtfläche (digitalisiert)	x 0,66666 <i>(2/3 der Fläche) =</i>	Nutzbare Dachfläche in m²
-------------------------------------	---	---

6.3.2. Ermittlung der installierten Leistung (kWp) anhand der Modulanzahl

Anhand der nutzbaren Dachfläche, auf der eine bestimmte Modulanzahl installiert werden kann, wird die installierbare Leistung bestimmt. Seit 2017 standardisieren die Hersteller von Solarmodulen unterschiedliche Größen mit Variationsmöglichkeiten bei Unterkonstruktion, Modulinstallation (Größe und Position der Montagebohrungen). In dieser Arbeit wird für eine flächendeckende Berechnung der installierten Leistung ein Modultyp gewählt, der für alle Flächen gleichermaßen gilt. Mit der Wahl des Modultyps ET-M660300WW/WB 300W (ET SOLAR 2020) stehen Angaben zur Modulgröße und -leistung fest. Auf der ermittelten nutzbaren Fläche (75%) wird die Anzahl der Photovoltaikmodule festgestellt, die auf der verfügbaren Fläche montiert werden kann und als ganze Zahl ausgewiesen.

Formel: mögliche Modulanzahl

Nutzbare Dachfläche in m² <hr style="width: 20%; margin: 0 auto;"/> Faktor 1,70 m²	= mögliche Modulanzahl (abgerundet auf ganze Zahlen)
---	---



Elite 1500V
HIGH EFFICIENCY MODULE

ET-M660320WW/WB 320W
ET-M660315WW/WB 315W
ET-M660310WW/WB 310W
ET-M660305WW/WB 305W
ET-M660300WW/WB 300W

Knowing voltage increase as one of the effective methods to decrease line loss, ET's Product Department and R&D Team are devoted to developing high-efficient module while we are trying any probability of more power output by technology innovation like upgrading voltage level and decreasing line loss. ET 1500VDC Module is designed to realize a lower LCOE of the power plant, by allowing longer cable operation and longer string to pull down combiner-box quantity and narrow cable size.

Abb. 72: Angaben zum Modul-Typ Elite High Efficiency Module (ET SOLAR 2020)

Größe:
1650 x 992 x 35mm
gerundet auf 1,70 x 1,00 m
= 1,7 m² Faktor Modulgröße

Modulleistung:
300 -320 W_{Peak}/Stück:
Hier festgelegter Wert für die Berechnungen = 300 W_{Peak}

Anschließend wird die mögliche Anzahl der Module mit der angegebenen *Leistung der Module* multipliziert. Daraus ergibt sich die *installierte Leistung* einer Anlage für die jeweilige Teildachfläche. Anhand der bestimmten Stückzahl der Module wird die *installierte Leistung* bestimmt. Die *installierte Leistung* ist die *Höchstleistung einer Anlage* pro Teildachfläche. Gemäß der angegebenen Modulleistung von 300-320 Wp in der Herstellerbeschreibung, wird hier eine Modulleistung von 300 Watt festgelegt. Mit dem Faktor 0,3 kW peak (300 Watt) wird automatisch ein realistischer Verlustfaktor bei der Berechnung der installierten Leistung mit einkalkuliert. Alle Werte zwischen 240-400 Watt stehen für eine mittlere Modulleistung.

Formel: Installierte Leistung

300 W_{Peak} (0,3 kW_{Peak}) Modulleistung x	[Teildachfläche area (m²) ----- Faktor Modulgröße (1,7 m²)]	= Installierte Leistung (P_{Anlage}) in kW_{Peak}
<p>P_{Anlage} = installierte Leistung/ Anlagenleistung (in Kilowattpeak kW_{Peak}) area = Flächengröße in m² (ArcGIS) Modulleistung nach STC * = 300-320 W_{Peak} p (Faktor 300 kW_{Peak}) *Standard-Testbedingungen (STC = standard test conditions)</p>		

Berechnungsbeispiel:

<p>P_{Anlage} = [267,66 m²/ 1,70 m² Solargröße (170 x 100 cm)] = 157 Module x 0,3 (kW_{Peak} Modulleistung) = 47,10 kW_{Peak} installierte Leistung</p>

Auf dem Gebäude 0003 kann *theoretisch* auf der Teildachfläche 0003-1 eine PV-Anlage mit 157 Modulen errichtet werden, die insgesamt eine installierte Leistung von 47,10 kW_{Peak} besitzt (Prüfung der Statik, Traglast, Denkmalschutz, Stadtbildsatzung etc. des Daches vorausgesetzt).

6.3.3. Berechnung der Nennleistung über den Flächenbezug

Es wird weiter unterschieden zwischen der *Nennleistung*, als „normale verschleißoptimierte Leistung“ – (auch die reale Leistung genannt) und der *installierten Leistung*, als theoretische Höchstleistung einer Anlage bei besten Rahmenbedingungen. Somit bezeichnet die Nennleistung einer Photovoltaikanlagen die Energiemenge, die auch tatsächlich im Jahr gewonnen werden kann. Sie liegt bei PV-Anlagen aus monokristallinen Solarzellen bei 5,7 m² pro kWp.

Die Gegenüberstellung der „verschleißoptimierten Leistung“ (Nennleistung) einer Anlage und der „theoretischen Leistung“ (installierte Leistung) erfordert hier ergänzend die Berechnung der Nennleistung, die sich für PV-Anlagen aus der nutzbaren Dachfläche (*066qm_nutzarea*) mit dem darauf bestehenden Solarpotenzial in kW Peak ergibt.

Formel: Nennleistung kW Peak

$\frac{\text{Teildachfläche area (m}^2\text{)}}{5,7 \text{ m}^2 \text{ (für 1 kW}_{\text{Peak}}\text{)}}$	$= \text{Nennleistung kW}_{\text{Peak}}$
---	--

Berechnungsbeispiel:

Die Ableitung des Faktors (5,7 m² = 1 kW_{Peak}) wird hier erläutert:

1 Modul mit 300 W/p hat die Größe 1,7 m ²	267,66' m ² / 1,7 Modulgröße = 157 Module 157 Module x 0,3 kWp = 47,10 kWp
300 W/1,7 m ² = 176,471 W/m ²	267,66' / 47,10 kW _{Peak} = 5,7m ²
1m ² Modul hat 176 Wp Nennleistung	1 kWp Nennleistung = 5,7 m ² Fläche

6.3.4. Ermittlung des spezifischen Jahresertrags (in kWh)

Der spezifische Jahresertrag in kWh/a ergibt sich aus den jeweiligen Flächengrößen und den Einstrahlungswerten für alle untersuchten Teildachflächen. Da angenommen wird, dass die nutzbare Dachfläche mit PV-Modulen des Modeltyps belegt wird, ergibt sich pro Teildachfläche ein spezifischer Jahresertrag. Der Jahresertrag wird anhand eines Durchschnittwertes der Solarstrahlung (DWD 2018) berechnet und zum Vergleich mit dem ermittelten Solarstrahlungswert aus der Potenzialanalyse dieser Arbeit berechnet. Der Richtwert der Solarstrahlung liegt bei < 900 (kWh/m²/a). Anschließend wird wieder die Abweichung beider Werte ermittelt.

Formel: Jahresertrag theoretisch kWh

Installierte Leistung (kW _{Peak}) x	$\frac{\text{Durchschnittliche Solareinstrahlung (900 kWh/m}^2\text{/a)}}{\text{(kW}_{\text{Peak}}\text{)}}$	= Jahresertrag _{theoretisch} (in kWh/a)
--	--	---

Berechnungsbeispiel:

47,19 MWp x 900 kWh/a/kWp = Jahresertrag theoretisch in kW/a = 42.390 kWh.

Formel: Jahresertrag real kW/m²

Installierte Leistung (kW _{Peak}) x	$\frac{\text{Solareinstrahlung (kWh/a)}}{\text{(kW}_{\text{Peak}}\text{ aus Potenzialanalyse)}}$	= Jahresertrag _{real} (in kWh/a)
--	--	--

Berechnungsbeispiel:

47,52 MWp x 1.268,71 kWh (Area066_kWha = Potenzialwert simuliert) kWh/a/kWp = Jahresertrag theoretisch in kW/m² = 59.756,37 kWh. Die prozentuale Abweichung zwischen den berechneten Jahreserträgen verhält sich zwischen -100 % bis + 50 %. Bei Gebäude 0003 liegt der Durchschnittswert des Jahresertrages um 40 % über dem simulierten Wert.

Formel: $Y2/(X2/100) - 100 = -/+ \%$

$\frac{59.756,37 \text{ kWh/a}}{(42.390 \text{ kWh/a} / 100)}$	→ 100	= + 40,97 %
--	-------	-------------

Bestimmung der Abweichung

Ein Blick auf die Abweichungen **zeigt**: Bei der Beispielrechnung ergibt sich zwischen der installierten Leistung und der Nennleistung eine Abweichung von 0,3 %. Betrachtet man die Abweichungsraten aller Teildachflächen, so sind Abweichungen von bis zu maximal 50 % zu erkennen, die zwischen Höchstleistung und realistischer Leistung möglich sind.

- Für alle weiteren Berechnungen wird der reale Jahresertrag verwendet.
- Diese Arbeit zeigt auf, welche Standorte nach der aufwendigen Methode der Solarpotenzialanalyse einen niedrigeren oder höheren Jahresertrag einbringen als mit dem Durchschnittswert des DWD (2018).
- Die Peaks werden sichtbar und beantworten die Frage, an welchen Standorten überdurchschnittlich mehr oder weniger Strom gewonnen werden kann. Eine Standortwahl sollte sich auf die hier im Plusbereich liegenden Standorte konzentrieren. Auch die Standorte mit 100 % niedrigerem Ertrag – ohne Ertrag – sind entsprechend zu berücksichtigen.

- Hier wird deutlich, welche Standorte nach der Solarpotenzialanalyse einen niedrigeren oder höheren Jahresertrag einbringen als der Durchschnittswert vorgibt. Darauf kann in weiterführenden Arbeiten eingegangen werden.

6.3.5. Kalkulation der Anfangsinvestitionen für PV-Strom

Flächendeckend wurde eine Kostenkalkulation für PV-Solarstrom erstellt, indem (1.) die Anfangsinvestitionen für die Errichtung der Anlagen, (2.) die jährlichen Betriebskosten und auf 20 Jahre aufgestellt wurden. Anschließend werden die voraussichtlichen Gesamtkosten aufgestellt, von denen Kostenfaktoren und die Kosten pro Energieeinheit (Euro/kWh) abgeleitet sind.

Die Kosten einer Photovoltaikanlage setzen sich aus den Planungskosten sowie den Kosten für Module, die notwendige Unterkonstruktion, Wechselrichter, Messeinrichtungen und Netzanschluss sowie den Montagekosten und den sonstigen Systemkosten zusammen, die bedingt durch die Photovoltaikanlage für bau- oder elektrotechnische Maßnahmen aufgewendet werden müssen. Zu den sonstigen Systemkosten nach Satz 1 zählen insbesondere erforderliche Mehraufwendungen für Brandschutz, Sicherheit und Statik (MF BW 2021b).

- **Wichtig: Die Kostenkalkulation ist nicht vergleichbar mit einer Wirtschaftlichkeitsberechnung im Sinne einer vollständigen Rentabilitätsprüfung. Es wird keine Kapitalverzinsung angewendet, da das Land Baden-Württemberg als Träger der Universität jährlich festgelegte Mittel für die Verwaltung und Instandhaltung der landeseigenen Gebäude zur Verfügung stellt.**

Tab. 19: Investitionskosten nach PV-Anlagengrößen (eigene Darstellung)

Investitionskosten nach Anlagengröße (Installierte Leistung)		bis max. 10 kWp	10-50 kWp	51-100 kWp	100-450 kWp	Bis max. 750 kWp
Aufwendung in Euro						
1.	PV-Generator EXE Solar 370 Monokristalline Halbzellen	5.670,00	23.120,00	40.500,00	57.930,00*	
2.	1) Montage und 2) Montagesystem (Dachbefestigung, Vermessung, Montage, Gestelle für Flach oder Schrägdach, Erdung, nach DIN, Anschlusskasten, etc.)	2.935,00	9.460,00	9.720,00 10.950,00	15.985,00*	390.000,00
3.	Baugerüst, Absturzsicherung	1.100,00	2.100,00	3.100,00	4.100,00*	
4.	Elektronik (Anschluss, Wandler Messung, AC-DC- Leitungen, Anschlüsse, Wanddurchbrüche, Trafosysteme, nach DIN, etc.)	1.213,00	11.625,00	15.380,00	23.575,00*	29.150,00
5.	1) Wechselrichter 2) (extra Generatoranschlusskasten, teilweise Webbasiertes Monitoring)	1.867,00	2.995,00	1) 435,00 2) 3.770,00	5.250,00*	

6.	1) Überspannungsschutz, Gleichstromseite 2) Parametrierung des RCT-Wechselrichters	540,00 115,00	618,00 115,00	1) 1.005,00 2) 170,00	1) 1.186,00* 2) 188,00*	39.500,00
7.	Stromspeichersystem (RCT Power oder Tesla Powerwall 2) (Überspannungsschutz, Speicherwechselrichter, -atterie - oder Direktvermarktungsbox >100kWp.	10.175,00	26.520,00	38.160,00	52.940,00*	k.A.
8.	Weitere Leistungen bei Inbetriebnahme (Anmeldung bei Netzbetreiber, Umbaukosten, Zählerinstallation)	160,00	160,00	160,00	160,00*	160,00
9.	Wartung und Pflege (1. Jahr) (Instandhaltung, Wartung Speicher und PV-Anlage, Störungsbeseitigung)	330,00	550,00	770,00	990,00*	4.140,00
10.	Sensor-Webbasiertes (1. Einrichtung) Monitoringsystem	255,00	930,00	950,00	1.406,00*	2.000,0
11.	Inbetriebnahme (Montage Direktvermarktungsbox etc.)	276,00	276,00	276,00	276,00	276,00
	Gesamtkosten pro Anlagengröße	24.636,00 €	78.469,00 €	150.139,00 €	163.979,33 €	458.650,00 €
	<ul style="list-style-type: none"> • Interpolierte Werte 					

Je nach Anlagengröße waren in der Literatur seit 2012 angewendete Kostenfaktoren zwischen 900 Euro⁴⁸, 1.200 Euro⁴⁹ und 2.500 Euro⁵⁰ pro kW Peak installierte Leistung zu finden. Das hing mit unterschiedlichen Preisentwicklungen zusammen: während die Preise für Solarmodule (mono- und multikristallin) allgemein sanken, stiegen die Preise produktabhängig für Wechselrichter und neuartige Solarmodule wie beispielsweise Module aus Dünnschiff-Solarzellen an. Zudem stiegen die Strompreise für Bezugsstrom während zeitgleich die Einspeisevergütung (EEG 2016) sank. Da die Kostenkalkulation in den letzten beiden Jahren starken Schwankungen unterlag, wurde hier auf aktuelle Preiskalkulationen eines lokalen PV-Anlagenanbieters zurückgegriffen, um einen aktuellen Kostenfaktor - abhängig von der Anlagengröße – abzuleiten. Aufgrund der aktuellen Situation bezüglich des Krieges in der Ukraine sind weitere Preissteigerung zu erwarten.

Bei Photovoltaik-Anlagen umfassen die Investitionskosten unterschiedliche Kostenfaktoren, die hier anhand von vier Angeboten analysiert und aufgelistet wurden. Teilweise beinhalten diese Preiskalkulation zusammengefasste Gesamtaufwendungen mehrerer Posten, um die betriebsinterne Kalkulation hier nicht gänzlich offen zu legen (SIERIG 2018). Nach diesen Vorlagen wurden allgemein gültige Kostenfaktoren für fünf unterschiedliche Größenklassen von PV-Anlagen abgeleitet. Diese Größenklassen entsprechen zugleich den Einspeisevergütungsklassen, die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2016) festgelegt sind. Ergänzend zu den Vergütungsklassen des EEG wurde eine zusätzliche Unterteilung der Größenklasse 100-750 kWp vorgenommen, indem die Kosten für Aufwendungen in der Tabelle linear fortgeschrieben wurden. Teilweise

⁴⁸ (Sierig 2018): zu Grunde gelegte Kostenvoranschläge der Firma RUOFF, Reutlingen sind im Anhang hinterlegt.

⁴⁹ (Energieexperten 2020)

⁵⁰ (KLÄRLE 2012) und (ET SOLAR 2020)

sind mehrere Posten in einer Aufwendung aufgelistet. Dies geschah, um die Aufteilung der Kosten transparenter darzustellen. In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Aufwendungen aufgeführt (s. Tab.18):

6.3.6. Ableitung des Kostenfaktors Anfangsinvestition

Die Ableitung der Kostenfaktoren erfolgte anhand von fünf Anlagengrößen nach installierter Leistung (kWp). Die ermittelten Investitionsvolumen pro Teildachfläche geben einen Richtwert für den erforderlichen Anfangsinvestitionen je Anlagengröße (Euro/kWp):

1. bis max. 10 kWp:	Gesamtkosten €/10 kWp (9,9 kWp)	→2.464,00 €/kWp
2. 10-50 kWp:	Gesamtkosten €/50 kWp	→1.569,00 €/kWp
3. 51-100 kWp:	Gesamtkosten €/100 kWp	→1.501,00 €/kWp
4. 100-450 kWp:	Gesamtkosten €/200 kWp	→ 820 €/kWp
5. bis max.750 kWp:	Gesamtkosten €/750 kWp	→ 612 €/kWp

An den Kostenfaktoren wird sichtbar, dass die Investitionskosten - laut Beispielen- mit zunehmender Anlagengröße sinken. Da in dieser Aufstellung das Investitionsvolumen pro kWp noch bei 2.464,00 Euro pro kWp liegt, sind bei größeren Anlagen bereits Kostenfaktoren unter 1.000 Euro pro kWp möglich. Dies entspricht recherchierten Kostenfaktoren aus den Jahren 2012-2015 und nicht den viel diskutierten Preisänderungen in der Branchenpresse. Allerdings sind diese Feststellungen aufgrund der aktuellen Situation während des Krieges in der Ukraine nicht mehr haltbar.

→ **Die Ableitung eines Kostenfaktors für jede Anlagengröße wird als wichtiger Schritt in dieser Arbeit angesehen, der die entwickelte Kalkulation in weiterführenden Arbeiten übertragbar macht.**

Tab. 20: Faktor €/kWp (F PV inv): Anfangsinvestitionskosten für PV-Anlagen (eigene Darstellung)

Investitionskosten	bis max. 10 kWp (10 kWp)	10-50 kWp (50 kWp)	51-100 kWp (100 kWp)	100-450 kWp (200kWp)	Bis max. 750 kWp (750 kWp)
Gesamtkosten in Euro	24.636,00	78.469,00	150.139,00	163.979,33	458.650,00
Faktor (F PV_{inv}) je Anlagengröße (in Euro/ kWp)	2.463,60	1.569,38	1.501,39	819,90	611,53
Faktor (F PV_{inv}) (gerundet)	2.464,00	1.569,00	1.501,00	820,00	612,00

Pro Teildachfläche wird anschließend anhand des Faktors (F PV inv) in €/kW_{Peak} installierte Leistung verwendet, der für die gesamten Installationskosten steht. Daraus ergibt sich ein Investitionsvolumen pro installierte Teildachfläche.

Formel: Faktor €/m² (F Invest_{PV area}): Anfangsinvestitionen pro m² genutzte Teildachfläche

$\text{Invest}_{\text{PV area}^*} =$	P_{Anlage} (kW _{Peak})	\times $F_{\text{PV inv}}$ (2.464 €/kW _{Peak})
$P_{\text{Anlage}} =$ installierte Leistung pro Teildachfläche (in kWp) $F_{\text{PV inv}} =$ Faktor in (€/kW _{Peak})		
$\text{Invest}_{\text{PV area}^*} =$ Gesamtkosten Teildachfläche (€/m ² area) * area = Flächengröße der Teildachfläche (m ²) (ArcGIS)		

In Abhängigkeit der installierten Leistung und der Zuweisung der gestaffelten Kostensätze weist die Kalkulation signifikante Kostensprünge zwischen den Anlagengrößen auf (S. Tab.20).

- Es zeigt sich, dass eine Anlage mit 9,90 kWp install. Leistung Anfangsinvestitionen von 24.393,60 Euro aufweist, während eine PV-Anlage mit 10,20 kWp install. Leistung in der nächsten Klasse 16.003,80 Euro Anfangsinvestitionen erfordert (Differenz ca. 8.000 Euro).
- Beim Klassenwechsel von 50 zu 100 kWp wirkt sich der Kostenfaktor geringer aus, sodass eine Anlage mit 49,80 kWp Investitionskosten von 78.136,00 Euro erfordert; eine PV-Anlage mit 51,00 kWp knapp drunter bei 76.551,00 Euro liegt (2.000 Euro).
- Klassenwechsel von 100 zu 450 kWp zeigt sich großer Unterschied: eine PV-Anlage mit 95,7 kWp erfordert 143.645,70 Euro Investitionsvolumen, während eine Anlage mit 101,10 kWp noch 82.902,00 Euro erfordert. Es zeigt sich ein signifikanter Rückgang der Betriebskosten (2,5%) von 3.591 Euro auf jährlich 2.072 Euro.
- Klassenwechsel von 450 zu 750 kWp: eine PV-Anlage mit 447,60 kWp install. Leistung unterscheidet sich zur 455,10 kWp PV-Anlage in sinkenden Investitionskosten von 367.032,00 Euro auf 278.521,20 Euro (ca. 88.000 Euro), die Betriebskosten sinken von 9.175 Euro auf 6.963 Euro ab.

Tab. 21: Faktor in %: Investitionskosten (Invest PV area) und Jährliche Betriebskosten (eigene Darstellung)

Anlagengröße P_{Anlage} (kW _{Peak})	Investitionskosten $F_{\text{PV inv}}$ (in Euro/kW _{Peak})	Betriebskosten $F_{\text{PV OE } 2,5\%}$ (2,5 % der Investitionskosten ($F_{\text{PV inv}}$))
9,90 kWp	24.393,60 Euro	609,84 Euro
10,20 kWp	16.003,80 Euro	400,1 Euro
49,80 kWp	78.136,00 Euro	1.953,4 Euro
51,00 kWp	76.551,00 Euro	1.913,78 Euro
95,7 kWp	143.645,70 Euro	3.591,14 Euro
101,10 kWp	82.902,00 Euro	von 3.591 Euro auf jährlich 2.072 Euro
447,60 kWp	367.032,00 Euro	9.175,8 Euro
455,10 kWp	278.521,20 Euro	von 9.175 Euro auf 6.963 Euro ab.

6.3.7. Kalkulation der Betriebskosten mit prozentualem Faktor (F PV OE 2,5 %)

Für die Berechnung der Betriebskosten gilt der *Bezugswert Investitionskosten (Invest PV area*)*. Die erwähnten Kostensprünge zwischen den Klassen schlagen sich folglich in den weiteren Kalkulationen der prozentualen Betriebskosten nieder. Unter Berücksichtigung der Preisentwicklungen in der Branche wird der **Faktor 2,5 % (F PV OE %)** für die Kalkulation der jährlichen Betriebskosten (*Operating Expenses*) gewählt. In der Praxis wird generell mit einem Betriebskostenfaktor von 1-2 % der Investitionskosten ausgegangen. Diese sind auch in den aufgestellten Betriebskosten unter 6.4.5. (Quelle: RUOFF, Reutlingen 2020) zu finden. Allerdings wird hier der Betriebskostenfaktor auf 2,5 % der Investitionskosten erhöht und flächendeckend für alle PV-Anlagengrößen angewendet, da mit Preissteigerungen zu rechnen ist.

Formel: Jährliche Betriebskosten (F PV OE 2,5 %)

jährliche Betriebskosten (in Euro) (F PV OE 2,5 %) =	Investitionskosten in Euro (Invest PV area)	x 0,025 %
---	--	-----------

Weitere Faktoren, die bei den jährlichen Kosten zu berücksichtigen sind, hängen sehr stark von den Preisen der Dienstleistungsunternehmen ab (Zählermiete, Antriebsstrom je Anlagengröße etc.). Um diese Kosten zu einem Teil in der flächendeckenden Berechnung zu berücksichtigen, wurden die aufgeführten Aufwendungen für Versicherung 0,35 % der Investitionskosten und die Instandhaltungskosten mit einem Kostenfaktor von 2,50 Euro pro m² angesetzt und berechnet. Dadurch steigen die Betriebskosten um die Höhe der zusätzlichen Aufwendungen. Diese Kosten sind in den Berechnungen einzeln ausgewiesen.

a. Versicherungskosten (0,35 % der Investitionskosten)

Die Versicherungskosten werden separat berechnet, um die Dimensionen einzusehen, die es finanziell für unterschiedliche Anlagengrößen haben kann.

b. Instandhaltung

Die Instandhaltungskosten zählen zu den laufenden Kosten einer PV-Anlage. Sie werden pro m² gerechnet.

Formel: Instandhaltungskosten

Instandhaltungskosten =	Nutzfläche der Teildachfläche (in m ²)	x 2,50 Euro/m ²
-------------------------	---	----------------------------

6.3.8. Die Gesamtkosten (€/a) und Preis pro Energieeinheit (€/kWh) von PV

Die Gesamtkosten für das erste Jahr umfassen in dieser Arbeit die Anfangsinvestitionen (nach 6.4.6.), die je nach Anlagengröße aufgestellt wurden. Hinzu kommen die prozentual kalkulierten Betriebskosten für das erste Jahr und die anfallenden zusätzlichen finanziellen Aufwendungen für Versicherung und Instandhaltung. Daraus ergibt sich die Summe der Gesamtkosten für das erste Jahr und aufgerechnet für 20 Jahre.

a) Gesamte Betriebskosten (F PV OE 2,5 %)

b) Gesamte Betriebskosten für 20 Jahre (F PV OE a20) x 20 Jahre

Formel: Gesamtkosten für 20 Jahre

Gesamte Betriebskosten (F PV _{OE a20}) =	+ Investitionsvolumen € (Invest _{PV area}) + jährliche Betriebskosten € (F PV _{OE 2,5 %}) + Vers. + Instandh. pro Teildachfläche €	x 20 Jahre
---	--	------------

Mit der Ausweisung der **Anfangsinvestitionen** und der **Betriebskosten im ersten Jahr** sind hier die **Gesamtkosten im ersten Jahr** und als **Gesamtkosten auf 20 Jahre** hochgerechnet.

Gesamtkosten (auf 20 Jahre) =	Anfangsinvestitionen	+ Betriebskosten (20 Jahre)
-------------------------------	----------------------	-----------------------------

c) Preis pro Energieeinheit Euro/kWh

Die **Gesamtkosten** sind für jede untersuchte Fläche ausgewiesen und ergeben mit dem ebenfalls auf 20 Jahre hochgerechneten Stromertrag den jeweiligen **Preis pro Energieeinheit** (Euro pro kWh).

Formel: Preis pro Energieeinheit

Preis pro Energieeinheit in Euro/kWh =	Gesamtkosten auf 20 Jahre (Euro) / Gesamtes Stromertrag (kWh/a)
---	---

6.3.9. Ermittlung der Einnahmen und Ausgaben nach EEG 2016 durch PV-Strom

Für die flächendeckende Berechnung der Einspeisevergütung und der EEG-Umlage pro Teildachfläche wird der Jahresertrag (kWh/a) mit den jeweiligen Vergütungssatz für unterschiedliche Anlagengrößen berechnet. Die Berechnung der EEG-Umlage setzt voraus, dass der Strombedarf durch den verfügbaren Anteil an selbst erzeugtem Strom gedeckt wird. Dadurch reduziert sich die einspeisbare Strommenge. Für den Eigenbedarf/Verbrauch wird eine EEG-Umlage fällig, während für den Reststrom, der eingespeist werden kann, noch eine Einspeisevergütung erzielt werden kann. Diese Punkte sind verhandelbar mit der Bundesnetzagentur und dem lokalen Netzbetreiber. Deshalb stellen diese Ergebnisse einen Richtwert dar.

➔ **Für die eigengenutzte Energiemenge fällt eine EEG-Umlage an, während für die eingespeiste Energiemenge eine Einspeisevergütung gezahlt wird.**

Hier wird zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass jeweils die Gesamtmenge des Jahresertrags entweder eingespeist oder eigengenutzt wird. Dafür werden die festgeschriebenen Vergütungssätze aus dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2016) verwendet:

Formel: monetärer Jahresertrag (Euro) pro Teildachfläche (Werte von EEG 2016; BRD 2016a)

Vergütungssatz 1

für Nennleistung < 10 kWp gilt **8,64 Cent/kWh**

Dachfläche 0003_02: 2,11 kWp Nennleistung, 4.137,41 kWh/a x 0,0683 Cent/kWh = 282,59 Euro.

Es weisen 654 Dachflächen eine berechnete Nennleistung von max. 10 kWp auf. Diese werden der Vergütungsklasse 1 zugewiesen und mit dem Vergütungssatz 6,83 Cent/kWp multipliziert.

Vergütungssatz 2

bei Anlagen bis 40 kWp = **6,63 Cent/kWh** Solarstrom

Dachfläche 0015-02: 39,26 kWp, 58.393,12 kWh/a x 0,0663= 3.871,46 Euro.

Es weisen 467 Dachflächen eine berechnete Nennleistung zwischen 10 und 40 kWp auf. Diese werden der Vergütungsklasse 2 zugewiesen und mit dem Vergütungssatz 5,19 Cent/kWp multipliziert.

Vergütungssatz 3

bei Anlagen von 40 bis 750 kWp = **5,19 Cent/kWh** Solarstrom

Dachfläche 1025-05: 681,90 kWp, 845.303,70 kWh/a x 0,0519= 43.871,26 Euro.

Es weisen 189 Dachflächen eine berechnete Nennleistung zwischen 40 und 750 kWp auf. Diese Dachflächen werden der Vergütungsklasse 3 zugewiesen und mit 6,79 Cent/kWp multipliziert.

Vergütungssatz 4

Für Anlagen ab 750 kWp liegt die aktuelle Einspeisevergütung bei 4,67 Cent pro kWh.

Da im Untersuchungsgebiet - nach den hier gewählten Parametern - **keine Teildachflächen mit einer Nennleistung ab 750 kWp** liegen, wird dieser Vergütungssatz 4 nicht berechnet.

Weiter wird die Gesamtvergütung für den gesetzlich garantierten Zeitraum von 20 Jahren berechnet. Ging man von einer Installation der Anlagen zum 1. Oktober 2022 aus, dann würde der festgelegte Vergütungssatz für die Stromeinspeisung ins öffentliche Energienetz bis Oktober 2042 gelten. Die flächendeckende Berechnung erfolgt mit dieser Formel für die jeweiligen Vergütungssätze 1 bis 4:

Formel: Einspeisevergütung (monetärer Ertrag) für 20 Jahre

Jahresertrag _{real} (in kWh/a)	X Vergütungssätze 1-4 (Euro/kWp) x 20 Jahre	= Ertrag (in Euro/ a20)
--	--	-------------------------

Ein besonderes Interesse besteht in der Ermittlung die monatlichen Einspeisevergütung. Je nach Höhe der Stromerzeugung variieren die monatlichen Erträge. Je Teildachfläche sind die jährlichen Vergütungssummen berechnet worden. Um die ertragreichsten Zeiträume über das Jahr mit dem Wärmebedarf zu vergleichen, ist eine monatliche Auswertung und Darstellung sinnvoll. Dabei spielt die Höhenlage des Gebäudes und die

Ausrichtung eine wichtige Rolle, da innerhalb Tübingens große Unterschiede bestehen. Wie bereits beschrieben, können die monatlichen Erträge auf den Dächern der Universität und des Universitätsklinikums stark variieren.

EEG-Umlage

Um den bisher geltenden Regelungen gerecht zu werden, wird die EEG-Umlage in dieser Arbeit jeweils für die Menge an Strom- und Wärmepotenzial berechnet. Dabei ist zu beachten, dass auch für Geothermie basierend auf dem EEG-Wärme Gesetz EEG-Umlagezahlungen erforderlich sind. Jeweils aus den Zahlen des Vorjahres wird die Höhe der EEG-Umlage für das Folgejahr berechnet. Die Höhe der EEG-Umlage wurde von den Übertragungsnetzbetreibern ermittelt. Um eine flächendeckende EEG-Umlage zu berechnen, werden die geltenden EEG-Umlagesätze vorgestellt.

Beispielrechnung Dachfläche 0003-1

- a. **Satz 2021 (EEG):** Die Berechnung der EEG-Umlage hat nach dem festgelegten Satz (EEG 2016) pro Kilowattstunde für den Energieertrag einer PV-Anlage zu erfolgen.
- b. **Satz 2022:** Im Folgejahr 2022 sinkt die EEG-Umlage auf **3,723 ct/kWh** und ergibt eine zu zahlende EEG-Umlage von **2.982,23 Euro**.
- c. **Satz für privilegierte Letztverbraucher:** Für Universitäten als Großverbraucher galt bisher eine Vergünstigung, wenn der *privilegierte Letztverbraucher*, eine Zertifizierungen nach Umweltmanagement DIN EN ISO 50001 und/oder EMAS vorweisen kann. Dies trifft für die Universität Tübingen zu und ergab eine Vergünstigung von minus 13% Begünstigung für 2022.

Formel EEG-Umlage: Satz 2021 (EEG 2016): 6,500 ct/kWh für Jahresertrag PV-Potenzial

PV-Jahresertrag 80.102,86 kWh/a	x 0,065 <i>ct/kWh</i>	= 5.205,69 Euro für Dachfläche 0003-1
------------------------------------	-----------------------	---

Es werden 13 % vom Satz für 2022 abgezogen, da von einer Installation ab frühestens 2022 ausgegangen wird:
(22/100) *87= **2.906,18 Euro**

- d. **Anlagen ab größer > 1 GWh:** Weiter gelten Vergünstigungen für Anlagen größer > 1 GWh PV-Stromproduktion. Es gilt: Die Einnahmeausfälle werden gestaffelt nach Verbräuchen auf die übrigen Endkunden umgelegt. Die Umlage beträgt im Strombezugsjahr 2022:
 - für den Stromverbrauch bis 1 GWh pro Jahr: 0,437 ct/kWh (2021: 0,432 Cent/kWh)
 - für darüberhinausgehende Strombezüge: 0,050 Cent/kWh
- e. **Weitere Begünstigungen:** Endkunden aus dem produzierenden Gewerbe, deren Stromkosten mehr als 4 % des Umsatzes betragen, können die Umlage auf Antrag beim Netzbetreiber für über 1 GWh hinausgehende Strombezüge auf 0,025 Cent/kWh begrenzen. Der Nachweis erfolgt z.B. über ein Testat eines Wirtschaftsprüfers.

Der Anteil der Geothermie darin beträgt 0,14 %. Umgerechnet fallen somit 0,0095 ct/kWh der bezahlten Umlage für die Geothermie an. Bei einem Zuwachs von drei weiteren Geothermiekraftwerken mit einer angenommenen Stromproduktion von ca. 10-15 MW_{el}, steigt der Anteil an der Umlage von 0,0095 auf 0,019 ct/kWh (0,14 auf 0,28 %).

- f. **KWK-Umlage:** Gemäß geltendem KWK-Gesetz ergibt sich für das Verbrauchsjahr 2022 eine KWK-Umlage in Höhe von 0,378 Cent/kWh (2021: 0,254 Cent/kWh) für alle Stromverbräuche, die an Abnahmestellen anfallen, die nicht unter die **Besondere Ausgleichsregelung (BesAR)** des EEG fallen. Die mögliche Ermäßigung für besonders energieintensive Unternehmen orientiert sich an der BesAR.

Formel EEG-Umlage für den selbstgenutzten PV-Strom pro Jahr und für 20 Jahre

Eigennutzung des Jahresertrag von PV-Strom (kWh)	→ Stromnutzung ist noch EEG-Umlage pflichtig	= Berechnung der EEG-Umlage für Bedarfsdeckung
Restmenge des produzierten PV-Stroms (EEG 2016)	→ Reststrom kann eingespeist werden	= Einspeisevergütung für Reststrom
EEG-Umlage/-Einspeisevergütung jeweils auf 20 Jahre	x 20 Jahre	= Gesamtaufwendungen und -einnahmen pro Teildachfläche

6.4. CO₂-Bewertung von Erdwärme und Photovoltaik

Während der Bezug von Strom und Wärme aus fossilen Energiequellen hohe CO₂-Emissionen verursacht, kann selbst produzierter Strom und Wärme die CO₂-Bilanz senken. Die CO₂-Werte werden für Solarstrom und Erdwärme bestimmt. Die Basiswerte bilden die vorangegangenen technischen Kennzahlen (Jahresertrag und Heizleistung). Daraus ergibt sich pro Untersuchungsfläche ein vergleichbarer Wert in t CO₂ / m², der den Indikator 3 bildet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Universität und Klinikum bereits einen hohen Anteil an Fernwärme und Ökostrom beziehen, deren CO₂-Äquivalente geringer ausfallen. Die Bestimmung der CO₂-Emissionen und des CO₂-Einsparpotenzials mithilfe der CO₂-Äquivalente nach GEMIS 2014 zeigen folgende Werte (s. Tab.7, S. 60):

- Oberflächennahe Geothermieanlagen (Erdwärmesonden/Wärmepumpen: 0,0865 kg/kWh CO₂)
- Tiefengeothermische Wärmeproduktion: 0,2653 g CO₂-Äqu./kWh.

Formel: CO₂-Werte von Erdwärme

CO ₂ -Werte (kg/kWh) =	Wärmepotenzial Erdwärme (Heizlast in kWh/a)	x CO ₂ -Äquivalent (0,0865 kg/kWh)
-----------------------------------	---	---

Die CO₂-Emissionen einer Solaranlage wird anhand des Jahresertrages in kWh berechnet.

- 0,062-bis 0,129 kg/kWh CO₂ für Photovoltaikanlagen je nach Solarzelle.

Formel: CO₂-Werte von Photovoltaik

CO ₂ -Werte (kg/kWh) =	Solarpotenzial Strom (Jahresertrag in kWh)	x CO ₂ -Äquivalent (0, 129 kg/kWh)
--------------------------------------	---	--

6.4.1. CO₂-Bewertung des Wärme- und Stromverbrauchs (2015)

Der Wärmeendenergieverbrauch ist je nach Energiemedium (Fernwärme, Erdgas, Heizöl) als Mengenangabe in Liter, Volumen (m³) und in Kilowattstunden pro Jahr (kWh/a) ausgewiesen. Als Bezugsgröße für den jeweiligen Brennstoff gilt der *Untere Heizwert H_U*, der nicht für alle Gebäude verfügbar ist, sondern die Zählerwerte des Gesamtenergieverbrauchs ohne Abzug eines Verlustfaktors für größere Gebäudekomplexe.

Formel: CO₂-Emissionen des Wärmeverbrauchs

CO ₂ -Emissionen (kg/kWh) =	Wärmeverbrauch (Fernwärme, Erdgas, Heizöl kWh)	x CO ₂ -Äquivalent (0,241 kg/kWh)
---	--	---

Es gelten für die Nutzung von Fernwärme, Erdgas und Heizöl folgende CO₂-Werte (IINAS 2014⁵¹):

- Fernwärme-Mix: 0,295 kg/kWh.
- Fernwärme aus Holzhackschnitzel: 0,091 kg/kWh (spezifischer Wert Stadtwerke Tübingen 2021)
- Erdgas: 0,241 kg/ kWh.
- Heizöl: 0,313 kg/kWh.

Die Bestimmung der verursachten CO₂-Emissionen des Stromverbrauchs (2015) erfolgt anhand des CO₂-Äquivalents für 100 % Ökostrom des Landes Baden-Württembergs.

- Ökostrom: 0,040 kg/kWh⁵².

Formel: CO₂-Emissionen des Stromverbrauchs

CO ₂ -Emissionen (kg/kWh) =	Stromverbrauch Ökostrom in kWh	x CO ₂ -Äquivalent (0, 040 kg/kWh)
---	-----------------------------------	--

6.4.2. Beispielhafte Kalkulation der CO₂-Besteuerung des Energieverbrauchs

Bereits seit 1. Januar 2021 gilt in Deutschland das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG), dass eine CO₂-Steuer für Öl und Gas vorschreibt. Sie beträgt 25 Euro pro Tonne CO₂. Während für private

⁵¹ (IINAS 2014): Werte unter Berücksichtigung der „vorgelagerten Prozesskette bis zu Übergabe im Gebäude (inklusive des Mehraufwandes für Wärme- / Stromerzeugung und ihre Hilfsenergie im Haus“ (siehe auch GROßKLOS, 2014)

⁵² (VuB RV 2018) Zum Vergleich werden für die vorhandene Menge an Solarstrom auch die CO₂-Äquivalente aus PV-Strom (amorph 0,083 kg/kWh CO₂) und Ökostrom (0,040 kg/kWh CO₂) berechnet.

Energieverbraucher die CO₂-Steuer bereits über den Einkaufspreis von Heizöl und Erdgas entrichtet wird, sind in Zukunft auch pauschale Abgaben möglich. Diese gewinnen insbesondere dann an Bedeutung, wenn die Energie nicht vom Energielieferanten bezogen wird, sondern eine Eigenproduktion besteht. Dies trifft zu, wenn die Universität Tübingen das hier ermittelte Energiepotenzial selbst gewinnt und nutzt. Diese Abgaben richten sich nach den ermittelten CO₂-Emissionen, die durch den Energieverbrauch für Strom und Wärme verursacht werden (BRD 2019).

➔ **Statt einer im Energiepreis enthaltenen CO₂-Steuer zu berechnen, die in den kommenden Jahren - verdeckt – im Energiepreis enthalten ist, wird die CO₂-Steuer in dieser Arbeit separat ausgewiesen.**

➔ **Für eine vollständige Steuerermittlung sind in weiterführenden Arbeiten die Ertragssteuer zu berücksichtigen.**

Zukünftig ist mit steigenden Umweltabgaben pro verursachte CO₂-Tonne zu rechnen (s. Kapitel 3.3.8.). Hierzu werden für die Feststellung des möglichen CO₂-Steuervolumens unterschiedliche Steuersätze pro Tonne CO₂ angesetzt. Der monetäre Wert des CO₂-Einsparpotenzials wird mit demselben CO₂-Steuersatz berechnet wie die Berechnung des Steueraufkommens des Verbrauchs. Daraus ergibt sich eine direkte Umrechnung von CO₂-Emissionen in CO₂-Steuern. In Anlehnung an HUNEKE (2017) wird vereinfacht eine direkte Umrechnung der CO₂-Werte (in t CO₂) vorgenommen.

Formel: CO₂ Bepreisung für Strompotenzial

Photovoltaic Potenzial (kWh _w /a) x	CO ₂ -Äquivalent (ÖKOstrom = 0,040 g/kWh)	= CO ₂ -Emission x CO ₂ -Preis
Erdwärme Potenzial (kWh _{el} /a) x	CO ₂ -Äquivalent (Erdwärme = 0,0875 g/kWh)	= CO ₂ -Emission x CO ₂ -Preis

Nach der Ermittlung des CO₂-Einsparpotenzials werden für die CO₂-Werte nun die zukünftigen Besteuerungssätze festgelegt:

1. **25 Euro pro Tonne CO₂**: Dieser Wert entspricht einer ersten Einführung seit 2021 (Bundesregierung 2018): 25 Euro pro t CO₂ wäre zunächst ein Einstiegswert.
2. **40 Euro pro Tonne CO₂**: 2019 verlangte die grüne Koalition bereits 2019 für eine t CO₂ pro Liter Benzin: 40 Euro pro t CO₂ mit schrittweiser Erhöhung bis 2025.
3. **50 Euro pro Tonne CO₂**: weitere Abstufung bis 2025.
4. **75 Euro pro Tonne CO₂**: entspräche (UBA 2019c) einer angemessenen Bepreisung.
5. **100 Euro pro Tonne CO₂**: erst ab 100 Euro/t CO₂ entfaltet die CO₂-Steuer eine Lenkungswirkung (UBA 2021).
6. **200 Euro pro Tonne CO₂**: ab 2030 werden Wärme- und Strommedien (UBA 2021) mit einer CO₂-Steuer von ca. 200 Euro/Tonne CO₂ besteuert werden, die alle Kompensationsmaßnahmen

finanziell decken würde und somit eines CO₂-Schattenpreises entsprechen würde, die die Verursacher durch diese Summe selbst tragen würden⁵³.

Formel: CO₂ Bepreisung für Energieverbrauch

Wärmeverbrauch (kWh _w /a) x	CO ₂ -Äquivalente (Fernwärme-Mix: 0,091 kg/kWh Erdgas: 0,241 kg/ kWh Heizöl: 0,313 kg/kWh)	= CO ₂ -Emission x CO ₂ -Preis
Stromverbrauch (kWh _{el} /a) x	CO ₂ -Äquivalent (ÖKostrom = 0,040 g/kWh) (Solarstrom = 0,062-bis 0,129 kg/kWh)	= CO ₂ -Emission x CO ₂ -Preis

Die berechneten Steuerkosten zeigen beispielhaft, welche Kosten pro Energieträger zu den Verbrauchskosten hinzukommen. Allerdings werden diese Kosten bisher direkt vom Energieanbieter auf den Strompreis umgelegt und sind im Strompreis bereits enthalten (LÜBBERT 2007, BACH & WITTENBERG 2019, HUNEKE 2017, SCHWENKE 2019).

⁵³ Das Land BW setzte 185 Euro pro t CO₂ als Schattenpreis fest und zieht diesen von Investitionskosten in erneuerbare Energien ab. Seit 2022 gelten 210 Euro pro t CO₂-Schattenpreis (MF BW 2021a, MF BW 2021b, MF BW 2021c).

7. Vorstellung und Interpretation der Ergebnisse

Zunächst werden die Untersuchungsflächen nach ihren Größen und Eignungen vorgestellt, sodass die räumliche Verteilung der Standorte im Untersuchungsgebiet sichtbar wird. Weiter wird an Histogrammen veranschaulicht, welche Bandbreite die Werte innerhalb eines Parameters aufweisen, um eine hohe Diversität in der Flächenbewertung zu verdeutlichen. Zusätzlich zeigen Übersichts- und Vergleichskarten auf, wo günstige und ungünstige Standorte liegen. Nach den bestimmten Indikatoren sind die untersuchten Gebäude klassifiziert und in Diagrammen und Übersichtskarten visualisiert, um die Eigenschaften der Standorte zu visualisieren.

7.1. Analyse der Untersuchungsflächen

Zu den Untersuchungsflächen zählen alle nutzbaren Flächen des Universitätsklinikums und der Universität Tübingen, die sich im Landeseigentum befinden:

- **259 Gebäude und Gebäudekomplexe** von Universität und Universitätsklinikum verteilen sich auf **188 Flurstücke**.
- Die gesamte Gebäudegrundfläche beträgt **243.500 m²**, die in dieser Arbeit die Untersuchungsfläche darstellt.
- Die 259 Gebäude weisen insgesamt **1.311 Teildachflächen** auf.
- Die Dachflächen ergeben laut Digitalisierung eine **Gesamtdachfläche von 258.559 m²**.
- Nach Abzug der bebauten Grundstücksfläche ergibt eine berechnete Freifläche von **1.275.000 m² mit** Bepflanzung, Grünanlagen und anderen Installationen. Um dieses Flächenpotenzial kann die Untersuchungsfläche in weiterführenden Arbeiten erweitert werden.

In den Gesamtergebnissen sind die Einzelwerte aller untersuchten Standorte aufsummiert. Die Flächenangaben sind aus den digitalisierten Dachflächen und den Flurstückskarten entnommen. In dieser Arbeit werden die Gebäudegrundflächen untersucht.

Tab. 22: Flächenverfügbarkeit im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung)

Flächenbezug	Flurstücke Erdwärme	Gebäude- grundfläche	Teildachflächen Photovoltaik
Anzahl	188 Flurstücke	259 Gebäude	1.311 Teil-/Dachflächen
Gesamtfläche (m ²)	(ca. 1.518.500 m ²)	243.500 m ²	258.559 m ²
Nutzbare Flächen: Davon sind: 1.275.000 m² Freifläche			Davon sind: 172.355 m ² nutzbare Dachfläche

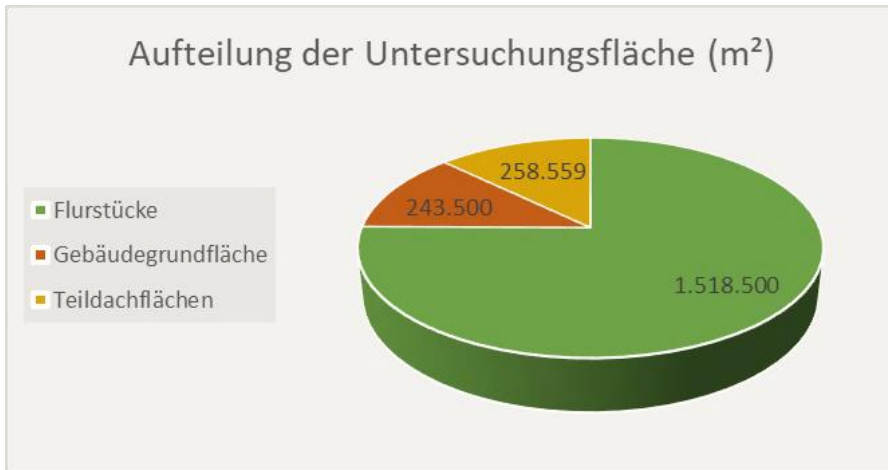


Abb. 73: Aufteilung der Untersuchungsflächen (eigene Darstellung)

7.1.1. Analyse der Teildachflächen

Die Flächen wurden mithilfe des digitalen Oberflächenmodells digitalisiert und weisen sehr unterschiedliche Größen auf. Von der kleinsten Fläche mit **2,48 m²** des Gebäudes 6064-10 bis zur größten Fläche von **3.964,21 m²** auf dem Gebäude 5016-01 reicht das Flächenpotenzial für PV-Anlagen. Auf diesen Flächen variiert das Solarpotenzial zwischen mindestens **2.359,91 kWh pro Fläche** auf dem Gebäude 6050-20. Dieser Wert würde beispielsweise den Strombedarf einer Privatwohnung decken. Während der maximale Strompotenzial-Wert von **6.466.265,58 kWh (GWh/a)** auf dem Gebäude 5016- 01, beispielsweise ein Klinik- oder Laborgebäude mit Strom versorgen kann. Insgesamt **805** Teildachflächen weisen eine Größe von kleiner als **86 m²** auf, weitere **260** Teildachflächen sind maximal **172 m²** groß und **91** Teildachflächen sind bis zu **258 m²** groß. Einige Flächengrößen liegen zwischen **258 m² und 1.032 m²**. Größere Flächen sind einzeln zu finden. Die größte Fläche weist mindestens **3.956 m²** Flächenpotenzial auf (Abb. 74).

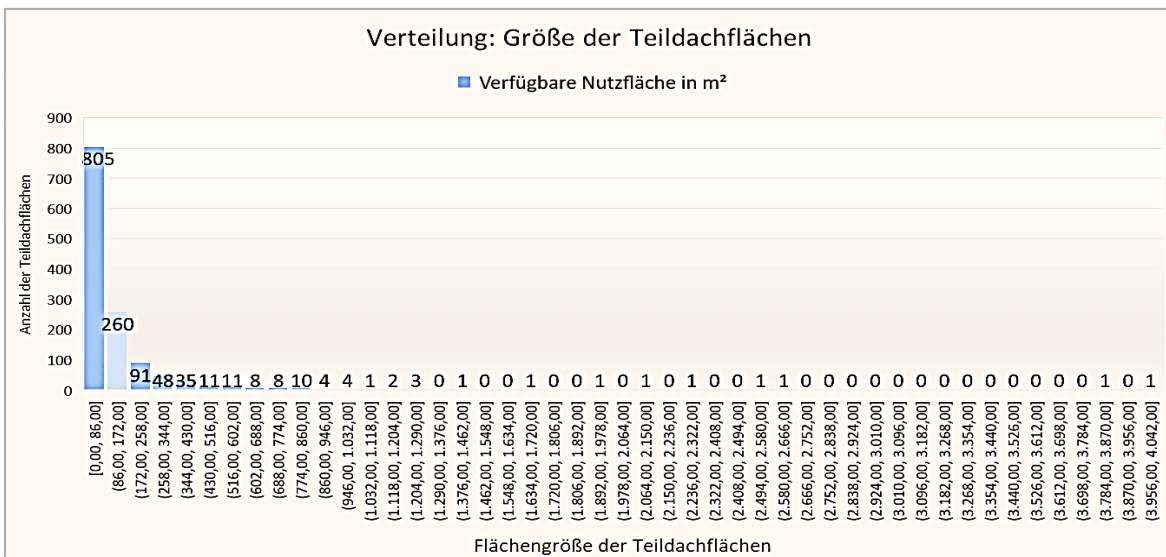


Abb. 74: Größenverteilung aller Teildachflächen nach m² (eigene Darstellung)

Von 805 Teildachflächen sind 288 kleiner als 20 m². 584 Teildachflächen sind zwischen 20-100 m². Davon sind 424 Teildachflächen zwischen 100 – 1.000 m² groß. Die größten Flächen Anlagen können 1.000-3.964 m² einnehmen und sind am besten für Eigenproduktion oder Vermietung geeignet. Die Verteilung des Jahresertrags bei den kleinen Flächen sehr niedrige Erträge und Erträge bis 35 MWh pro Jahr (Abb. 75).

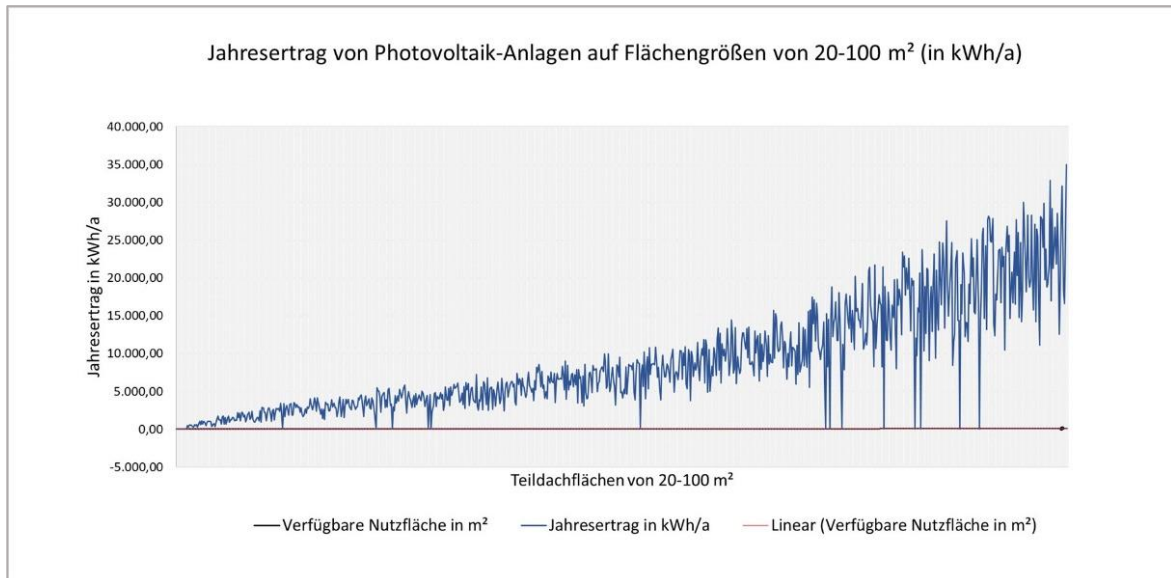


Abb. 75: Darstellung der Teildachflächen mit einer Größe von mindestens 20 m²-100 m² und deren Jahresertrag in kWh/a (eigene Darstellung)

Die Standorte mit den größten Teildachflächen weisen von 1.000 m² - 3.964 m² Fläche auf, die potenziell für Photovoltaikanlagen genutzt werden kann. Die Jahreserträge liegen zwischen 276 MWh bis 1,1 GWh Jahresertrag auf (Abb. 76).

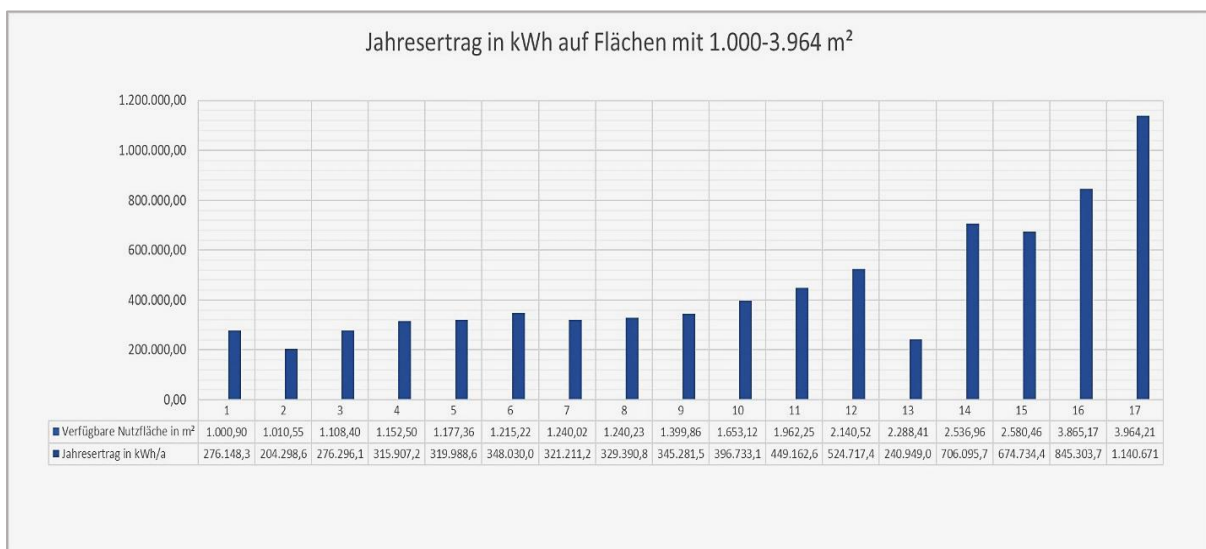


Abb. 76: Darstellung der 17 größten Teildachflächen zwischen 1.000 – 3.964 m² und dem Jahresertrag in kWh/a (eigene Darstellung)

7.1.2. Analyse der Gebäudegrundflächen

Die Gebäudegrundflächen weisen meist eine Größe von bis zu **760 m²** auf. 46 Gebäude haben eine Gebäudegrundfläche zwischen **760-1.520 m²**. Wenige Gebäude haben eine Gebäudegrundfläche von mehr als **3.800 m²** (Abb. 77).

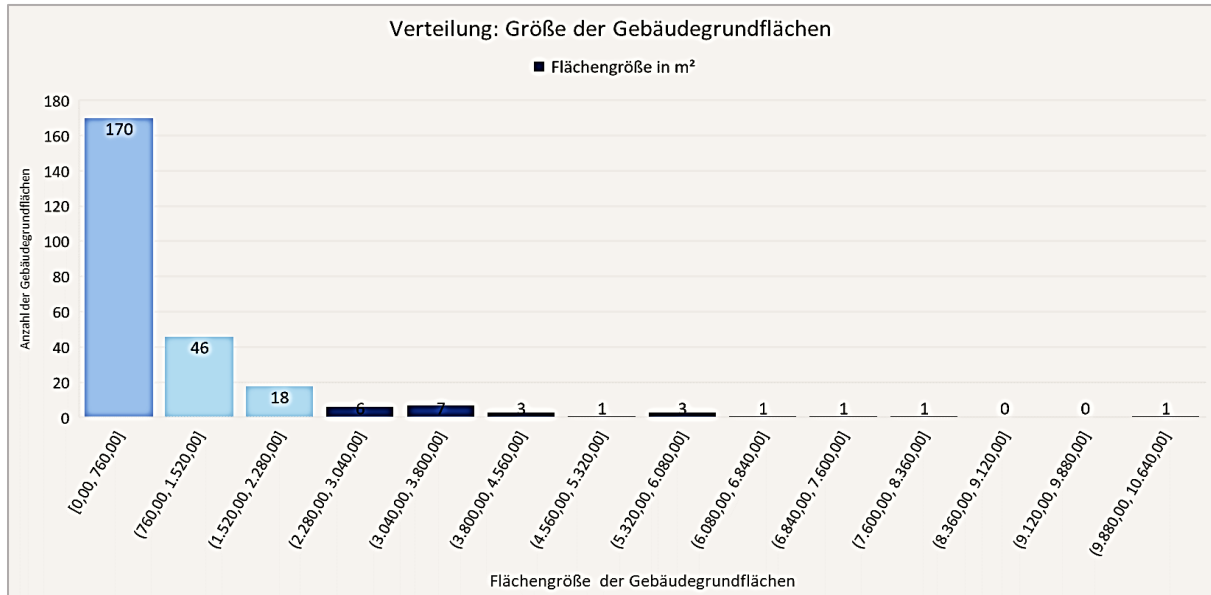


Abb. 77: Größenverteilung aller Gebäudegrundflächen nach m² (eigene Darstellung)

7.2. Flächenbewertung nach Indikatoren

Die abschließende Bewertung der Untersuchungsflächen erfolgt anhand der festgelegten Indikatoren. Einen Überblick über die Verteilung einzelner Kennzahlen geben die jeweiligen Histogramme, die eine hohe Diversität unter den Werten anzeigen. Farblich dargestellt sind die Werte in Klassen unterteilt. Bei Strom ist die Werteskala von **Grün nach Rot** und bei Wärme von **Blau nach Rot** eingeteilt und unterstützt die Darstellung, indem Werte

- **die positiv vorteilhaft gelten**, im Kartenmaterial **Grün oder Blau** dargestellt werden⁵⁴. Hierzu gehören hohe Potenzial- und Ertragswerte sowie niedrige Verbrauchs-, CO₂- und Kostenwerte.
- **die negativ nachteilig gelten**, im Kartenmaterial **Rot** dargestellt sind. Hierzu gehören niedrige Potenzial- und Ertragswerte, hohe Verbrauchs-, CO₂- und Kostenwerte.
- Bei Erdwärme steht rot für hohes Wärmepotential (rot =gut)



⁵⁴ Das Kartenmaterial ist im Anhang im DIN A3 Format hinterlegt und kann dort eingesehen werden unter: Anhang: Kartenblätter 1-30, DIN A3.

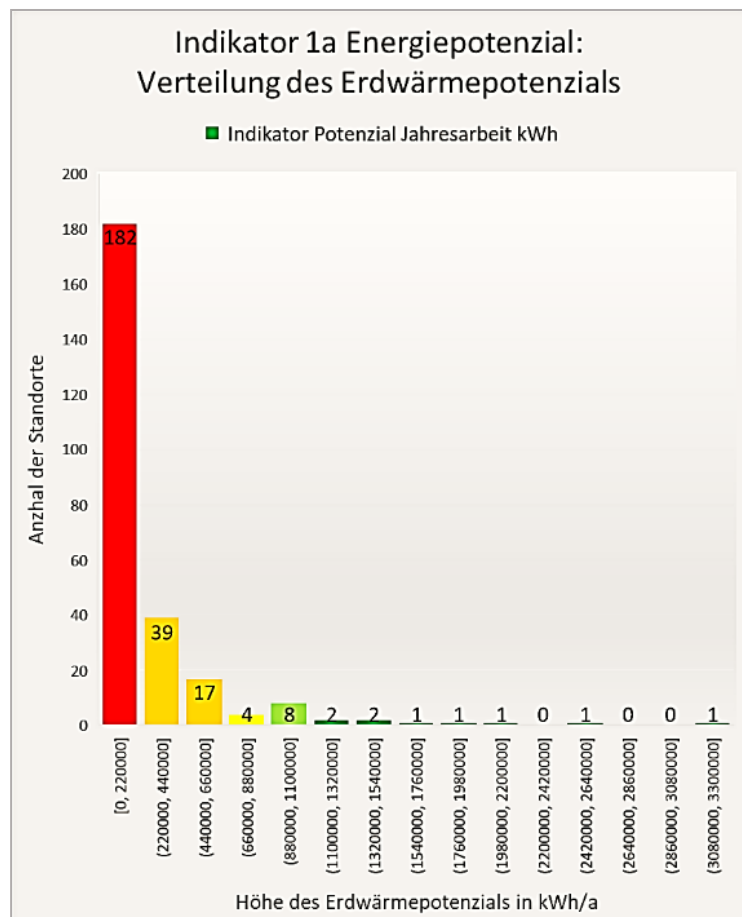
- Die Anzahl der Standorte pro Klasse ist in der Legende des Kartenblattes angegeben. Standorte, deren Werte weit über die durchschnittlichen Werte hinausgehen, sind als Ausreißer in dunkelrot markiert. Standorte, bei denen keine Daten vorhanden sind, sind schwarz markiert ⁵⁵.

■ Klasse 5: Ausreißer (bis 0,36 Euro/kWh) (19)	Symbol	Range	Label
	■	0,00	keine Daten vorhanden

7.2.1. Verteilung nach Erdwärmepotenzial - Indikator 1a (kWh/m²)

Im Gegensatz zu den Dachflächen, weisen die untersuchten 259 Gebäudegrundflächen eine geringe Verteilung auf. Viele potenzielle Erdwärme-Standorte besitzen ein geringes bis mittleres Erdwärmepotenzial, nur wenige potenzielle Standorte weisen ein signifikantes Erdwärmepotenzial auf. Die Auswahl an guten Standorten ist gering und bietet wenig Auswahlmöglichkeiten für Investitionen. Hinzu kommt die ohnehin schwierige Umsetzung innerhalb bebauter Areale und bei Bestandsgebäuden. Eine Konzentration auf die besten Standorte ist deshalb bei der Standortwahl sehr wesentlich. Dennoch sollten die untersuchten Standorte im Hinblick auf die steigenden Erdgaspreise für die Wärmeversorgung genutzt werden - wenn auch nicht immer Deckung besteht. Die Verteilung des Erdwärmepotenzials zeigt, dass die 182 Standorte ein geringes Wärmepotenzial bis 220 MWh aufweisen, bei 39 Standorte erreichte eine Jahresarbeit von 220-440 MWh. Die höchsten Werte liegen bei maximal 3,08 GWh pro Jahr (Abb. 78), deren Standorte in der Rangfolgenliste Top 20 Erdwärmestandorte aufgeführt sind (s. Rangfolgenlisten 5 (Uni) und 6 (UKT)).

Abb. 78: Indikator 1a Energiepotenzial
Verteilung des Erdwärmepotenzials auf
259 Standorte (kWh/a, eigene
Darstellung)



⁵⁵ In Kartenmaterial wird sichtbar, dass je nach Basistabelle unterschiedlich viele Standorte enthalten sind, das auf unterschiedliche Ausgangsdaten zurückzuführen ist, sowie auf die Unterschiede zwischen den digitalisierten Teildachflächen und den Gebäudegrundflächen (s. Anhang, Entnahme von einzelnen Spalten aus Originaldaten).

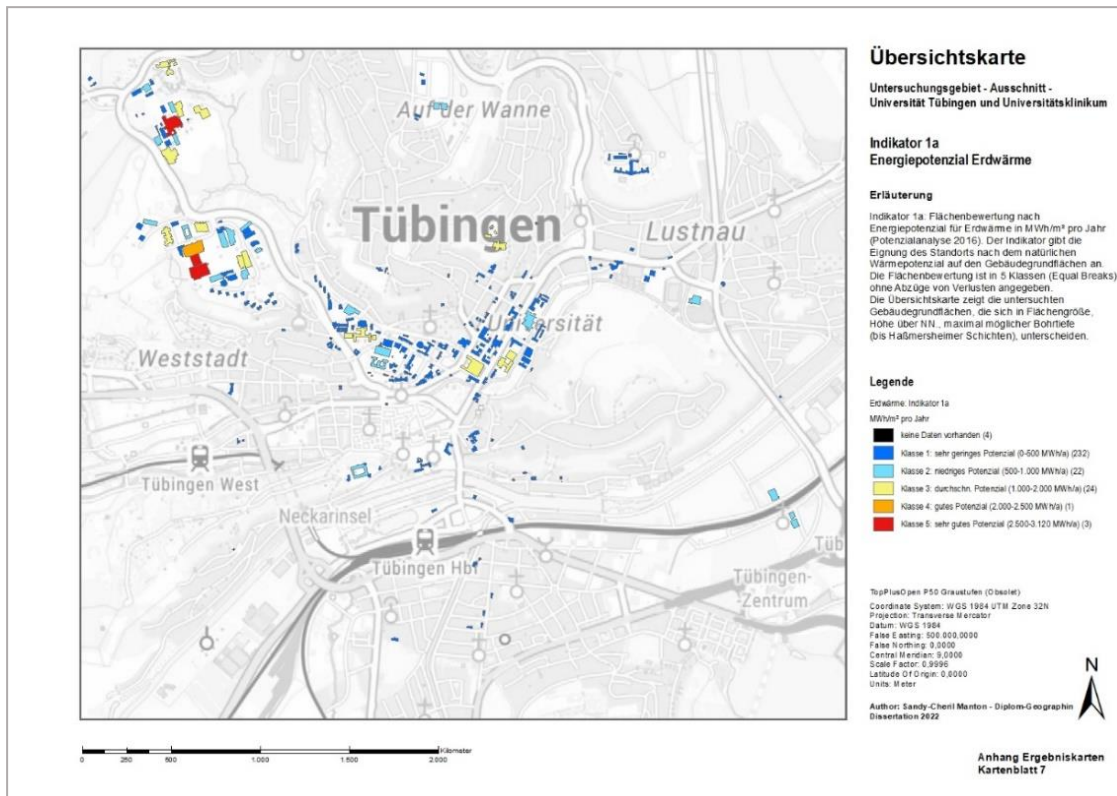


Abb. 79: Übersichtskarte des Wärmeverbrauchs im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung)

In Abbildung 79 (in DIN A4 im Anhang) ist das geringere Erdwärmepotenzial in den Bereichen des Campus Tal erkennbar, der sich durch das Ammertal und Teile des Neckartals erstreckt. Es stechen die Standorte auf dem Schnarrenberg und der Morgenstelle hervor, die hier rot markiert sind (hier rot=hohes Potenzial). Abhängig von der Größe der Fläche und der Höhenlage sind hier die höchsten Erdwärmepotenziale zu erwarten. Flächenbedingt liegen zwei Gebäude mit hohem Potenzial im Tal (Neue Aula (UNI), Frauenklinik (UKT)).

7.2.2. Verteilung nach Heizlast - Indikator 1b (kWh/m²)

Die Verteilung der Gebäudegrundflächen nach der konfigurierten Heizlast zeigt eine hohe Anzahl niedriger Werte und wenige sehr hohe Werte an (s. Abb. 80)

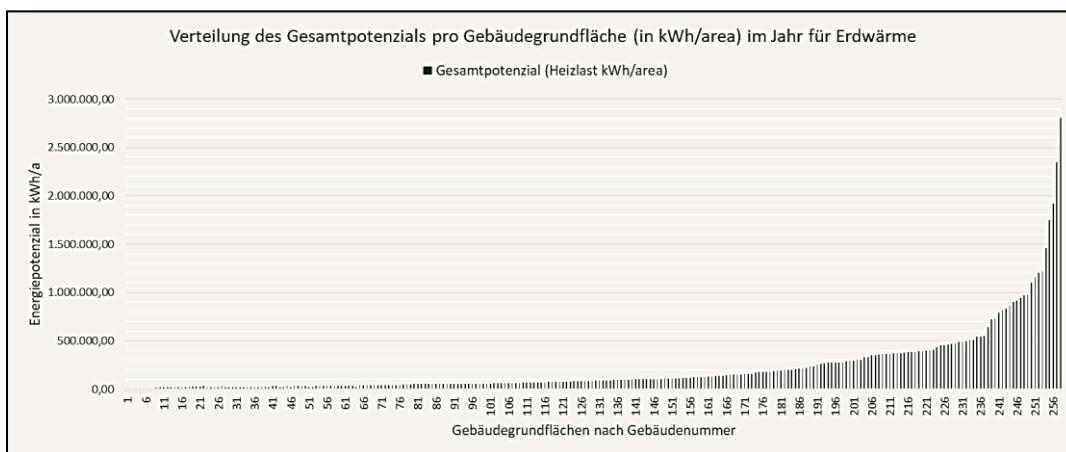


Abb. 80: Verteilung des Gesamtpotenzials pro Gebäudegrundfläche (in kWh/area) im Jahr für Erdwärme

7.2.3. Erdwärme - Indikator 2a (Euro/kWh)

Bei Erdwärme liegt der Preis pro Energieeinheit überwiegend bei **10-17 ct/kWh**, die höchsten Preise liegen zwischen **31-34 ct/kWh**. Der Kilowattpreis für Wärme spaltet sich auffällig in zwei Preisklassen. Eine insgesamt breite Verteilung und drei signifikante Klasse liegen vor: die erste Preisklasse bildet ein Kilowattpreis bis max. **0,20 Euro/kWh** (218 Standorte) und die zweite Preisklasse beginnt bei **0,24 Euro/kWh** bis max. **0,34 Euro/kWh** (32 Standorte, Abb. 81).

➔ Nach diesen Berechnungen beträgt der durchschnittliche Wärmepreis aus Erdwärme im Untersuchungsgebiet **0,14 Euro pro kWh_w**.

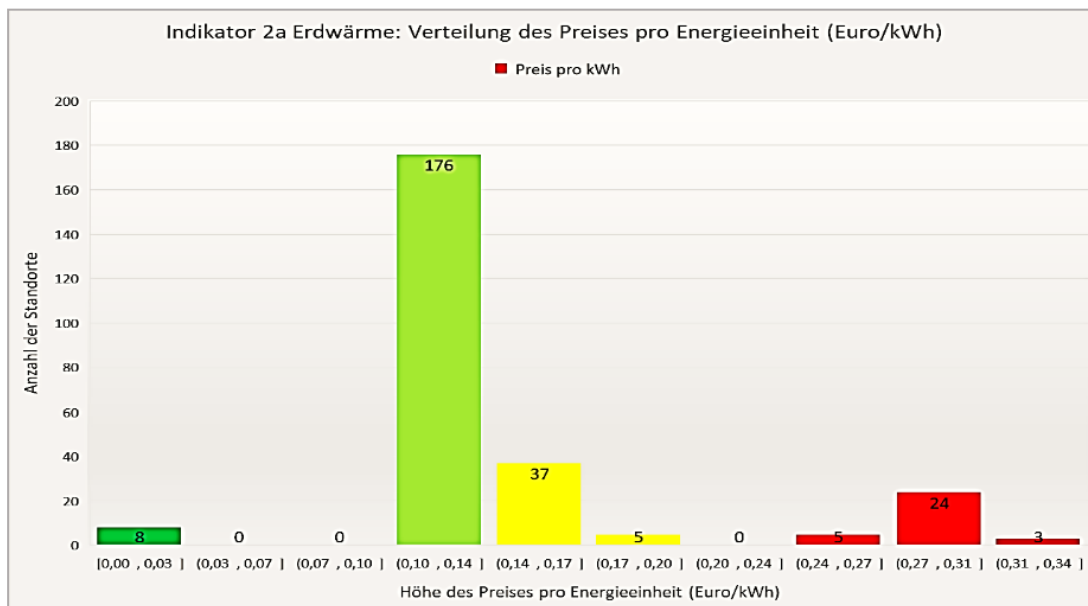


Abb. 81: Indikator 2a Erdwärme Verteilung des Preises pro Energieeinheit (Euro/kWh, eigene Darstellung)

Vergleichbare Fernwärmepreise werden kaum veröffentlicht, da sie großen Preisschwankungen unterworfen sind und meist intern durch Ausgleichsrechnungen angepasst werden. Der Vergleich zwischen den hier kalkulierten Energiepreisen und den entrichteten Verbrauchspreisen (2015) zeigt, dass der Kilowattpreis von Erdwärme geringer ausfällt als der Fernwärmepreis der Stadtwerke Tübingen (s. auch Vergleichskarten im Anhang).

7.2.4. Erdwärme - Indikator 2b (Preis pro Sondenmeter Euro/m)

Die Auswertung nach **Indikator 2b Preis pro Sondenmeter** zeigt bei Erdwärme an, wie hoch sich die erforderlichen Kostenaufwendungen in 20 Jahren pro m² verhalten. Die Gesamtkosten beinhalten die Investitionskosten zur Anlagenerrichtung und die Betriebskosten auf 20 Jahre. Bezogen auf die Sondenmeter ergibt sich ein Sondenmeterpreis (Preis pro m). Dieser liegt überwiegend zwischen 270-360 Euro/m. Einzelne Standorte weisen Kosten unter 90 Euro pro Sondenmeter auf (Abb. 82).

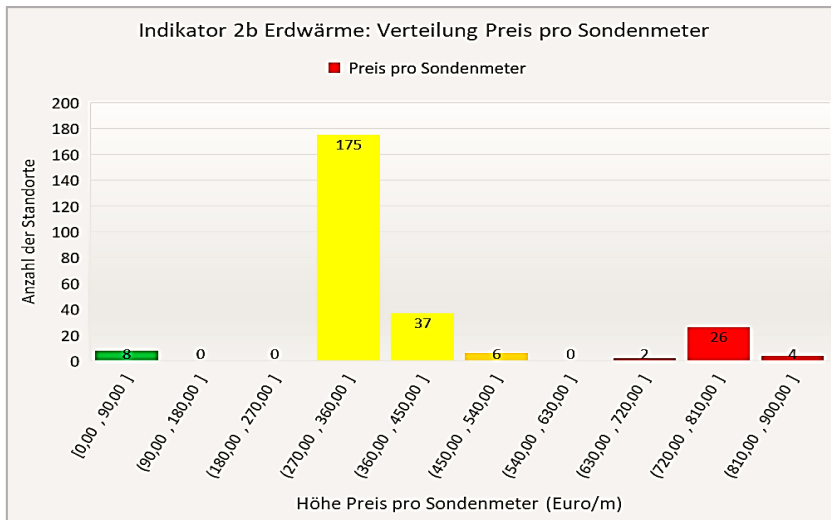


Abb. 82: Indikator 2b Erdwärme Verteilung des Preises pro Sondenmeter (Euro/m, eigene Darstellung)

7.2.5. Erdwärme - Indikator 3a CO₂-Wert (in t CO₂ pro Jahr)

Der **Indikator 3a** gibt den **CO₂-Wert** der Fläche an, der sich aus dem Energieertrag ergibt. Damit ist der Beitrag zur CO₂-Kompensation in der CO₂-Bilanzierung bereits ausgewiesen und kann in weitere Bewertungen aufgenommen werden. Hier zeigt sich die Verteilung der Werte von Erdwärme. In der Rangfolgenbildung sind diese Flächen an ihrem **CO₂-Wert** gemessen. Bei Erdwärme beginnen die CO₂-Werte pro Fläche bei 15,5 kg/m² und liegen überwiegend zwischen 15,5-21,7 kg /m². Die höchsten Werte weisen 31-34 kg/m² auf und würden in die CO₂-Bilanzierung für die Wärmeerzeugung eingehen (Rangfolgenlisten 7 (UNI) und 8 (UKT) im Anhang).

Die CO₂-Werte weisen eine sehr geringe Fehlerquote / bzw. Abweichung auf, da die Werte in Abhängigkeit des Energieertrags (kWh/a) bestimmt sind. Die Ableitung der Indikatoren basiert auf den technischen Kennzahlen Jahresertrag (kWh/a), Kilowattpreis (Euro/kWh) und CO₂-Bestimmungen (t CO₂/a) zur Standortbewertung. Es ermöglicht die Rangfolgenbildung mittels gewichteter Indikatoren

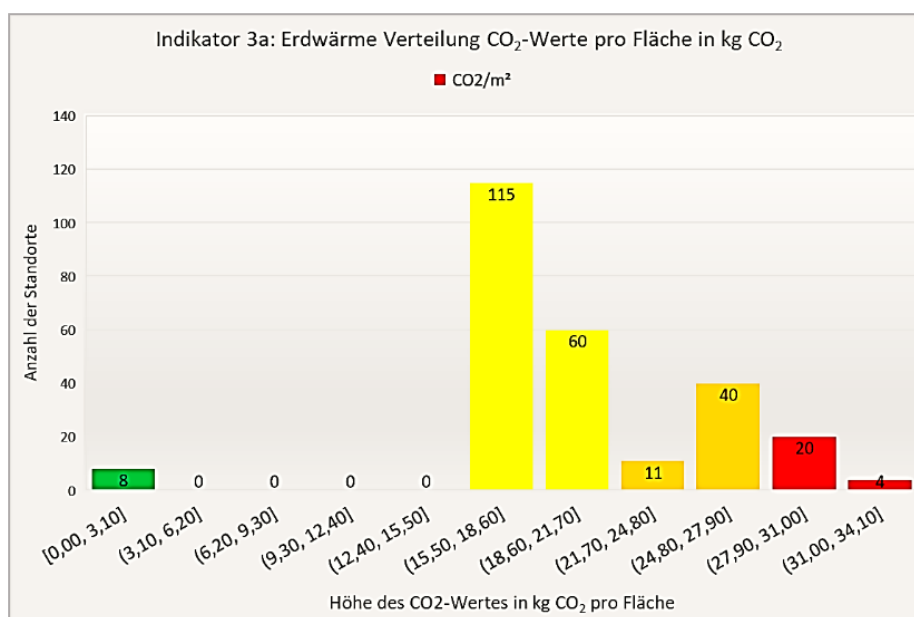


Abb. 83: Indikator 3a Verteilung des CO₂- Wertes in kg pro Fläche (eigene Darstellung)

7.2.6. Verteilung nach PV-Energiepotenzial - Indikator 1a (kWh/m²)

Hohe Diversität in Flächengröße und Eignung der Teildachflächen zeigt sich in der Verteilung nach Indikator 1a. Generell besteht im Untersuchungsgebiet eine sehr diverse Dachlandschaft, das für eine große Auswahl unterschiedlicher Standorte für Nutzungsarten und Investitionen steht. **Der Indikator 1a: Energiepotenzial** teilt die Dachflächen nach dem natürlichen Energiepotenzial durch Sonneneinstrahlung (in kWh/m²) ein. Die Angaben sind in kWh/ m² pro Jahr angegeben.

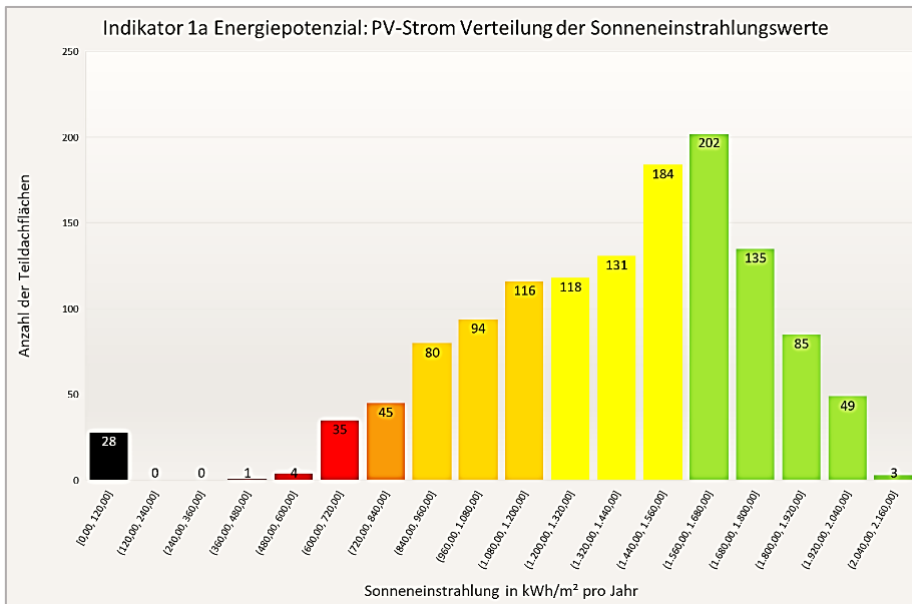


Abb. 84: Indikator 1a Energiepotenzial: PV-Strom Verteilung der Sonneneinstrahlung auf 1.311 Teildachflächen in kWh/a (eigene Darstellung)

Die größten Einstrahlungswerte pro m² befinden sich auf 3 Teildachflächen (2.040-2.160 kWh/m² im Jahr). Insgesamt weisen 202 Teildachflächen Werte zwischen **1.560-1.680 kWh/m² pro Jahr** auf. Die geringste Einstrahlung weist Werte bei **478,00 bis 600 kWh/m² pro Jahr** (Abb. 84) auf.

Im Vergleich dazu zeigt Abb. 85 die Verteilung des Energiepotenzials -ausgewiesen als Gesamtwert pro Teildachfläche. Hier ist ebenfalls eine hohe Varianz erkennbar, unter denen einzelne Ausreißer besonders hohes Gesamtpotenzial in kWh/area im Jahr aufweisen. Hier zeigt die Verteilung der Potenzialwerte, dass eine hohe Varianz besteht.

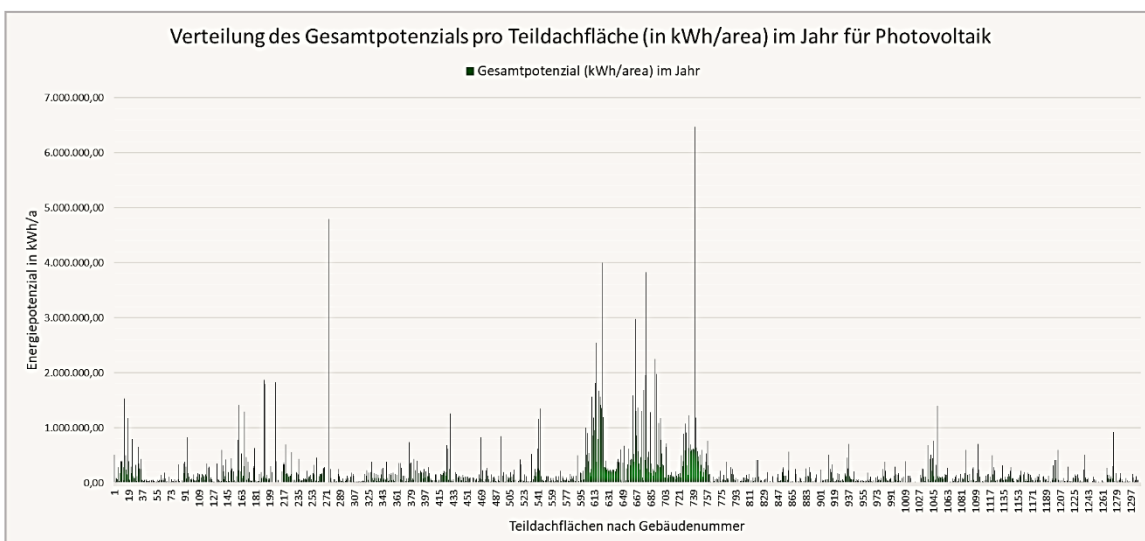


Abb. 85: Verteilung des PV-Gesamtpotenzials pro Teildachfläche (kWh/area pro Jahr) (eigene Darstellung)

Die Teildachflächen mit dem höchsten Potenzial sind in Abbildung 86 klassifiziert dargestellt⁵⁶. Gute Standorte sind über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt. Die höchsten Werte stechen dunkelgrün hervor.

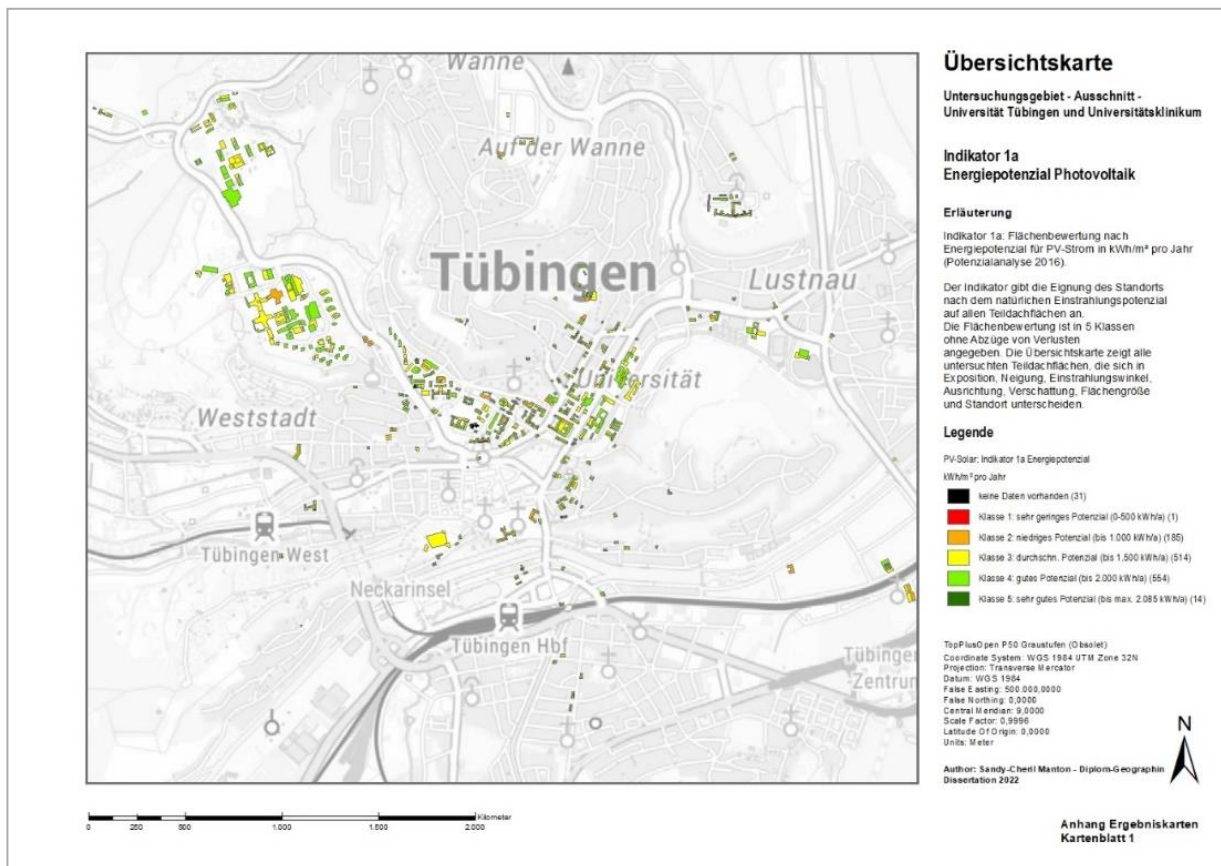


Abb. 86: Übersichtskarte Indikator 1a Energiepotenzial Photovoltaik (eigene Darstellung)

7.2.7. Verteilung nach PV-Jahresertrag - Indikator 1b (kWh/m²)

Die Klassifizierung nach Jahresertrag gibt an, welche Flächen nach der Anlagenkonfiguration die höchsten Jahreserträge versprechen. In der Rangfolgenliste nach Jahresertrag weisen einzelne Gebäude mehrere Teildachflächen unter den Top 20 aus, die besonders berücksichtigt werden sollten.

Am Beispiel des Standorts *7064 Fachbereich Informatik – Auf dem Sand, Tübingen* werden einzelne Teildachflächen aufgelistet und in der Detailansicht (Abb. 87) dargestellt. (s. auch Rangfolgenliste 1 (UNI) und 2 (UKT) im Anhang). Anhand der Detailansicht sind die Teildachflächen des Gebäudes in Klassen unterteilt. Der Jahresertrag wird als Wert in den Polygonen angezeigt. Das höchste Potenzial weist nicht unbedingt den höchsten Jahresertrag pro m² auf. Mithilfe des *Info-button* können die berechneten Parameter pro Teildachfläche einzeln aufgerufen werden.

⁵⁶ Die Übersichtskarte zu Indikator 1a ist vergrößert im Anhang unter Kartenblatt 1 einsehbar.

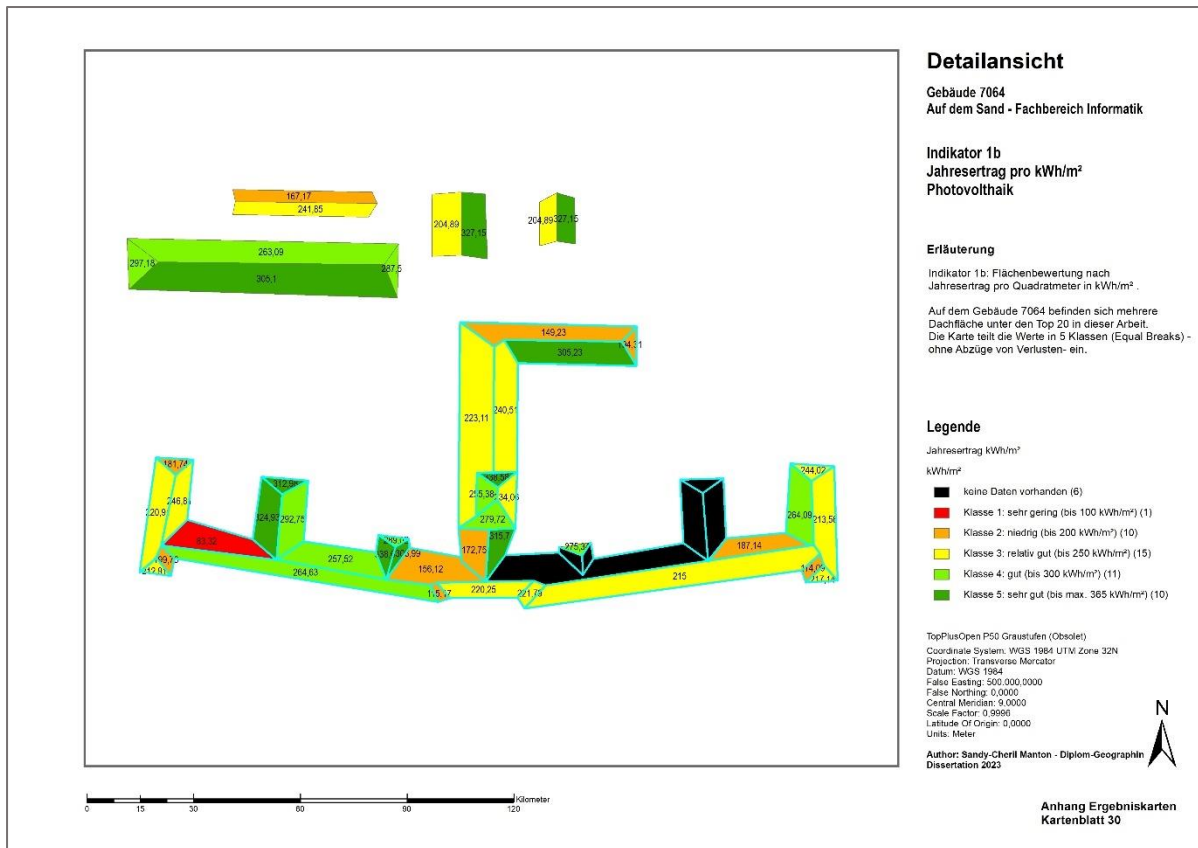


Abb. 87: Kartenausschnitt Indikator 1b Jahresertrag - Teildachflächen Photovoltaik (eigene Darstellung)

Teildach- fläche	1a Energiepotenzial (kWh/m ²)	1b Jahresertrag (kWh/m ²)	2a Kilowattpreis (Euro/kWh)	2b m ² Kosten (Euro/m ²)	3a CO ₂ -Wert (CO ₂ /m ²)	3b CO ₂ -Kosten (Euro/CO ₂)
7064-01	1745,42	305,23	0,08	480,77	39,37	7,87
7064-17	1499,57	264,63	0,09	484,7	34,14	6,83
7064-19	1847,54	324,93	0,07	483,24	41,92	8,38
7064-23	1945,83	338,6	0,11	723,16	43,68	8,74
7064-36	1503,01	264,09	0,09	482,82	34,07	6,81
7068-01	1735,11	305,1	0,08	464,38	39,36	7,87

7.2.8. Photovoltaik-Strom - Indikator 2a (Euro/kWh)

Der Indikator 2a Preis pro Energieeinheit in Euro/kWh sagt aus, was eine Kilowattstunde an diesem Standort kostet. Der Indikator 2a (Euro/kWh) ergeht aus der Berechnung der technischen Kennzahlen, die für eine Anlagenkonfiguration erforderlich sind, um die anfallenden Kostenaufwendungen (Anfangsinvestitionen, Betriebskosten mit Zusatzkosten auf 20 Jahre) zu kalkulieren. Anhand dieses Kilowattpreises wird die Rentabilität einer Anlage am Standort bewertet.

Es wird bei der Ausweisung des hier berechneten Preises pro Energieeinheit nochmals darauf hingewiesen, dass darin ausschließlich die Anfangsinvestitionen, Betriebskosten und Zusatzkosten auf 20 Jahre enthalten sind. Wie unter 6.4.8. aufgeführt, können Netzentgelte und EEG-Umlage hier nicht berücksichtigt werden. Die Berechnungen sind um weitere Kosten (EEG-Umlage, EEG-Einspeisevergütung, CO₂-Steuer und -Schattenpreis) erweiterbar. Die Verteilung der Werte für den Indikator 2a zeigt das folgende Histogramm

(Abb. 88). Erkennbar sind breit verteilte Werte des Preises pro Energieeinheit (Euro/kWh). Die höchsten Preise liegen zwischen **31-38 ct/kWh**. Die höchste Anzahl an Teildachflächen weist Preise zwischen **0,07 bis 0,14 ct/kWh** auf. Die niedrigsten Preise liegen bei **0,04 ct/kWh** und die höchsten bei **0,38 ct/kWh**.

➔ Nach diesen Berechnungen beträgt der durchschnittliche Strompreis aus Photovoltaik-Anlagen im Untersuchungsgebiet **0,13 Euro/kWh**.

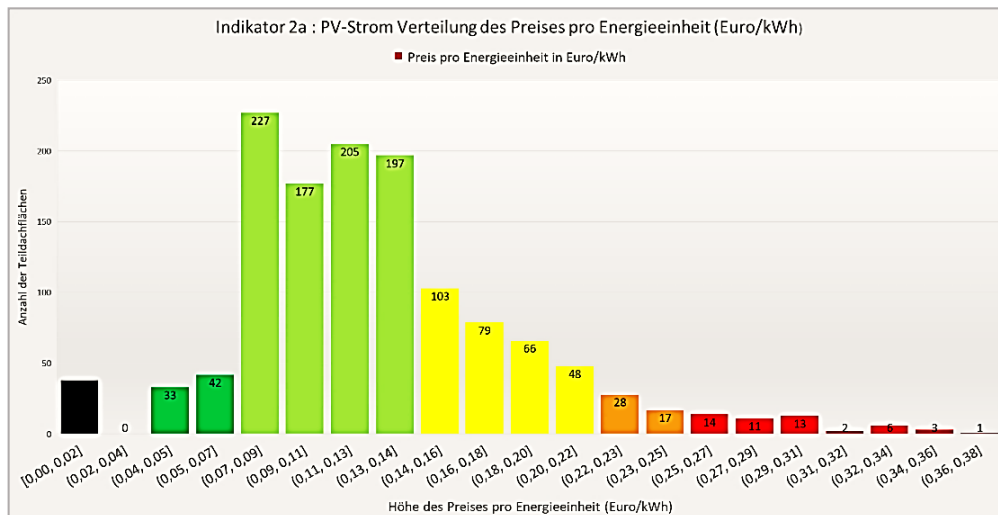


Abb. 88: Indikator 2a PV-Strom Verteilung des Preises pro Energieeinheit (Euro/kWh) (eigene Darstellung)

Die Abbildung 89 zeigt die Standorte mit den günstigsten Preisen pro Energieeinheit. Diese liegen breit verteilt über das Untersuchungsgebiet.

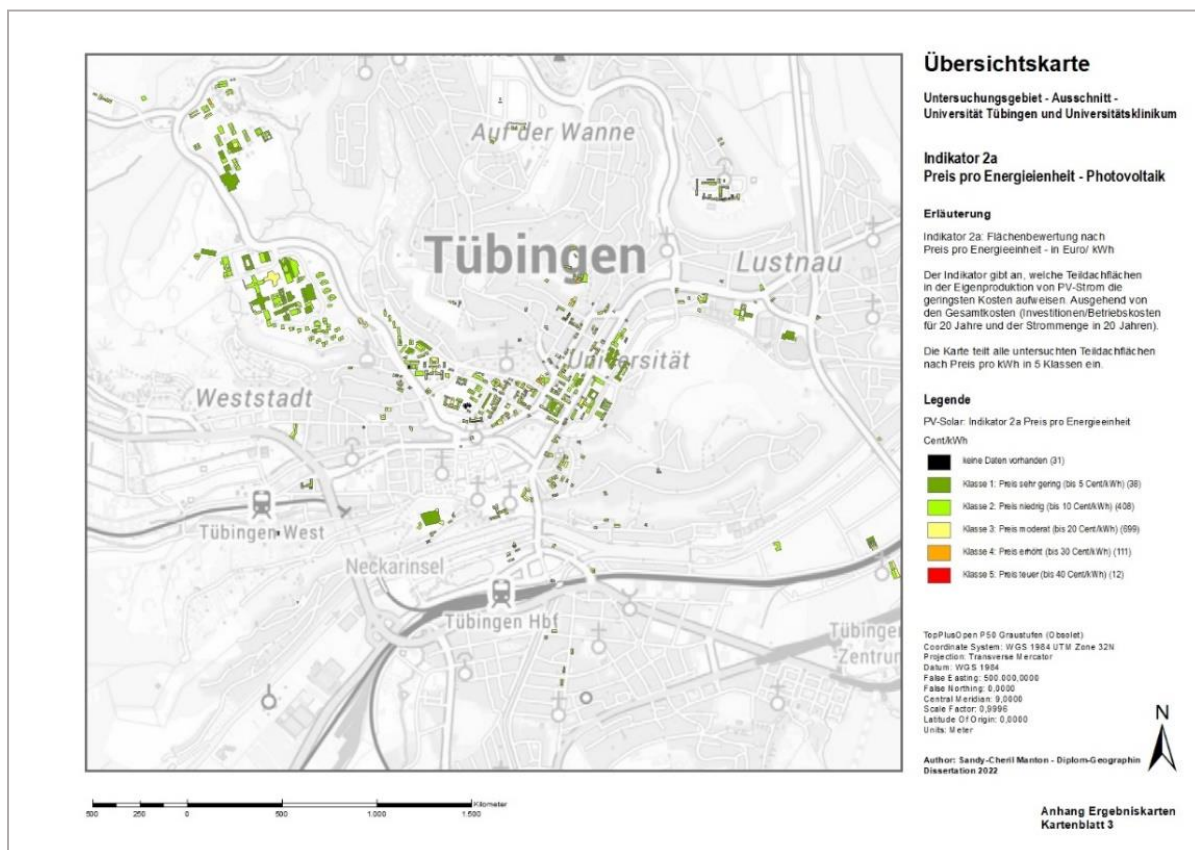


Abb. 89: Übersichtskarte Indikator 2a Preis pro Energieeinheit Photovoltaik (eigene Darstellung)

Im Vergleich zu den bezahlten Strompreisen (berechnet aus Energiekosten 2015 der Universität) zeigen einzelne Standorte einen niedrigeren Kilowattpreis auf. In der Auflistung zu Abb. 90 sind einzelne Teildachflächen der Schnarrenberg-Kliniken aufgeführt⁵⁷:

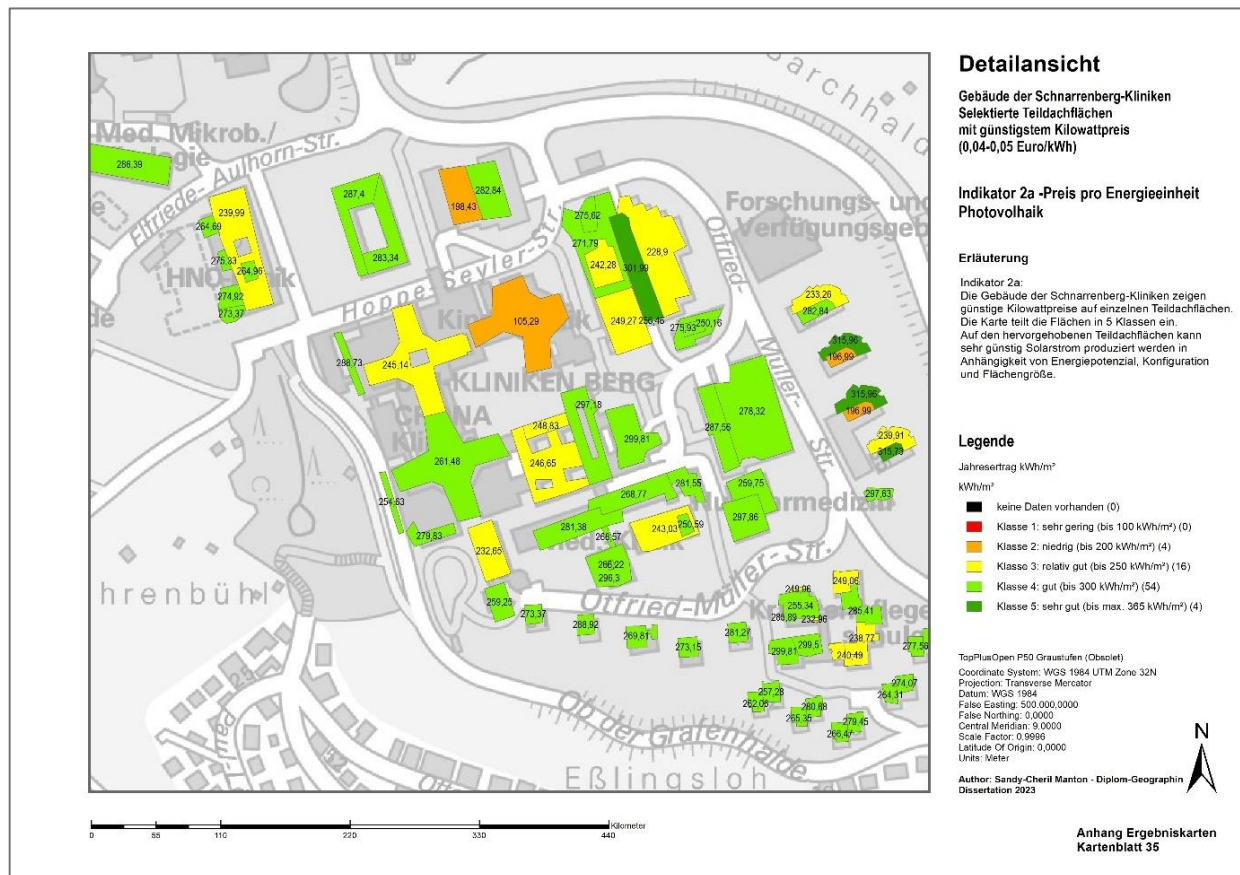


Abb. 90: Kartenausschnitt Indikator 1b Jahresertrag - Teildachflächen Photovoltaik (eigene Darstellung)

Teildach- fläche	1a Energiepotenzial (kWh/m ²)	1b Jahresertrag (kWh/m ²)	2a Kilowattpreis (Euro/kWh)	2b m ² Kosten (Euro/m ²)	3a CO ₂ -Wert (CO ₂ /m ²)	3b CO ₂ -Kosten (Euro/CO ₂)
4055-01	1482,61	261,48	0,04	219,46	33,73	6,75
4006-06	1713,45	301,99	0,05	276,9	38,96	7,79
4037-01	1701,77	299,81	0,05	276,81	38,68	7,74
4064-01	168,99	296,3	0,05	276,79	38,79	7,64

7.2.9. Photovoltaik-Strom - Indikator 2b (Euro/m²)

Der **Indikator 2b Preis pro m²** ergibt aus den Gesamtkosten in 20 Jahren. Umgerechnet auf die verfügbare Größe der Teildachfläche in m² ergibt sich ein flächenbezogener Wert. Anhand des Indikators Preis pro m² zeigt sich, welcher Quadratmeterpreis für Investitionen zu erwarten ist. Vergleiche für branchenübliche Quadratmeterpreise sind in Deutschland sehr rar, da die Kosten für PV-Anlagen von verschiedenen Kennzahlen abhängig sind. Allgemein sind Richtwerte nur für die Modulauslegung zu finden. Ein Quadratmeterpreis, der die Gesamtkosten auf den Quadratmeter umlegt, wird wegen vielen

⁵⁷ Diese Standorte werden in den Rangfolgenlisten 3 (UNI) und 4 (UKT) im Anhang aufgelistet.

unterschiedlichen Parametern pro Anlage nicht ausgewiesen. In der Verteilung der Werte zeigt sich bei **532** Teildachflächen ein Preis pro m² zwischen **440,00 bis 484,00 Euro**. Nur 11 Flächen weisen einen sehr geringen Preis pro m² auf (<44,00 Euro) und 366 Teildachflächen weisen einen Preis von **704,00-bis 748,00 Euro /m²** auf (Abb. 91).

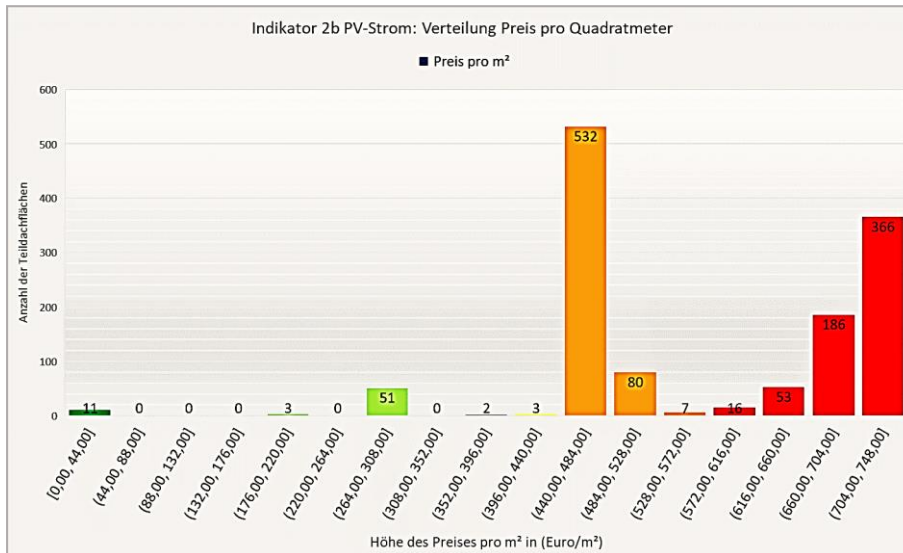


Abb. 91: Indikator 2b PV-Strom Verteilung des Preises pro Quadratmeter (eigene Darstellung)

7.2.10. Photovoltaik-Strom - Indikator 3a CO₂-Wert (in t CO₂ pro Jahr)

Der **Indikator CO₂-Wert** steht für die ermittelten CO₂-Werte pro Teildachfläche, die aus dem Jahresertrag (kWh/m²) ergeht. Der CO₂-Wert ermöglicht die Rangfolgenbildung der Flächen nach ihrem möglichen Beitrag zur CO₂-Kompensation durch die Nutzung und Investition in erneuerbare Energien⁵⁸ (Abb. 92). Die Rangfolgenlisten 7 (UNI) und 8 (UKT) sind im Anhang hinterlegt.

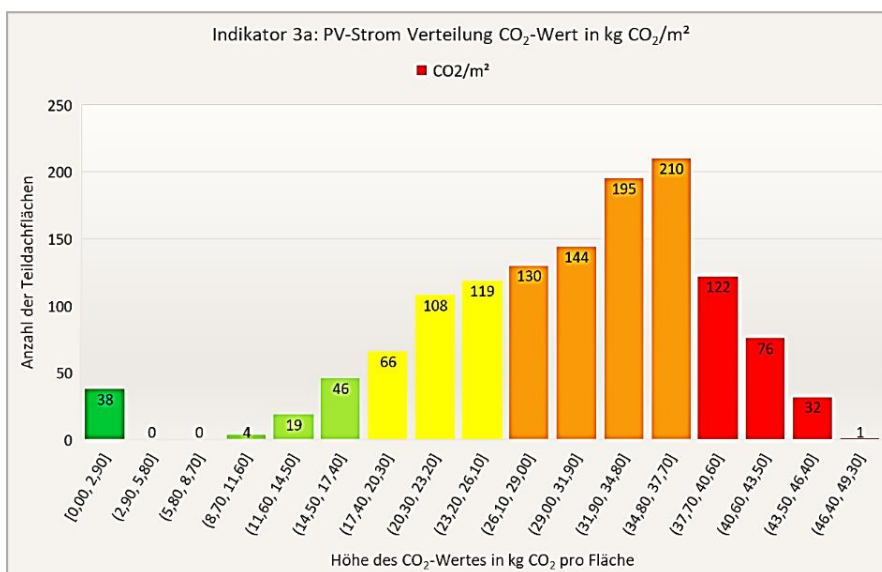


Abb. 92: Indikator 3 PV-Strom Verteilung CO₂-Wert in t CO₂/m² (eigene Darstellung)

⁵⁸ Die Rangfolgenliste hierzu ist im Anhang hinterlegt, s. auch Kap. 7.9.

7.2.11. Energieverbrauch: Indikators 4: Verbrauch_{Strom} und Verbrauch_{Wärme}

Die Rangfolgen nach Verbrauch dienen dem Vergleich mit dem Energiepotenzial und zeigen zusätzlich auf, welche Standorte - ausschließlich nach ihrem Energieverbrauch - hohe Kosten und CO₂-Emissionen verursachen. Hier kann ist der Handlungsbedarf und die Notwendigkeit auf erneuerbare Energien umzusteigen, besonders hoch⁵⁹.

Für den Vergleich der Energiekosten des Strom- und Wärmeverbrauchs (2015) ist ebenfalls der Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh; hier=Kilowattpreis) ermittelt. Anhand der verfügbaren Verbrauchswerte und deren Kosten ist eine Gegenüberstellung möglich. Dabei werden die Verbrauchskosten für Wärme insgesamt durch die Wärmekosten dividiert. Der Kilowattpreis, der für den Strom- und Wärmeverbrauch gezahlt wurde, wird dem Kilowattpreis der erneuerbaren Energien gegenübergestellt (s. Vergleichskarten im Anhang).

Es wird deutlich, dass der Kilowattpreis pro Gebäude unterschiedlich ausfällt und wo der Energieverbrauch einen hohen Kilowattpreis aufweist. Laut den Verbrauchsdaten (2015) ergibt sich für die Universität und das Klinikum:

- Durchschnittlicher **Wärmeenergiepreis von 0,87 Euro pro kWh_w**.
(Gesamtkosten: 12,1 Mio. Euro / Gesamtverbrauch: 138,5 GWh_w).
Im Vergleich dazu würde die Kilowattstunde aus Erdwärme **0,14 Euro pro kWh_w** kosten.
- Durchschnittlicher **Strompreis von 0,145 Euro pro kWh_{el}**.
(Gesamtkosten: 14,07 Mio. Euro / Gesamtverbrauch: 96,9 GWh_{el}/).
Im Vergleich dazu würde die Kilowattstunde aus **Photovoltaik 0,13 Euro pro kWh_{el}** kosten.

Die Daten ergeben sich aus den Verbrauchswerten des tba (2015) und sind pro Gebäude oder Gebäudekomplex ausgewiesen. Diese werden hier anhand des Wertes *kWh pro Jahr* gerankt. Hier wird deutlich, dass nicht generell Kosteneinsparungen erreicht werden, indem auf Erdwärme umgestellt wird.

7.2.12. Verteilung Wärmeverbrauch - Indikator 2a Preis pro Energieeinheit - Wärme

Der Indikator 4a Verbrauch_{Wärme} bestimmt den Verbrauchswert pro m² der Gebäudegrundfläche für Wärme in kWh pro Jahr. Der Kilowattpreis für Wärme spaltet sich auffällig in zwei Preisklassen. Die erste Preisklasse bildet ein Kilowattpreis bis max. 0,16 Euro/kWh (194 Standorte) und die zweite Preisklasse beginnt bei 0,56 Euro/kWh bis max. 0,72 Euro/kWh (9 Standorte) (Abb. 93).

Die hohe preisliche Differenz ergibt sich aus den zugewiesenen Aufwendungen nach Kostenfaktoren (s. 6.3.8ff). Ausgedrückt durch den Kilowattpreis sind in der Rangfolge die günstigsten Standorte aufgelistet. Hier würde sich eine Investition aufgrund des hohen Kilowattpreises des Verbrauchs besonders rentieren, dennoch besitzen diese Standorte nicht zwingend den höchsten Jahresertrag.

⁵⁹ Einer internen Bewertung der zuständigen Ämter wird nicht vorweggegriffen, da in dieser Arbeit keine Betrachtung des energetischen Sanierungsbedarfs und des Denkmalschutzes geschieht, die ausschlaggebend für Maßnahmen sind.

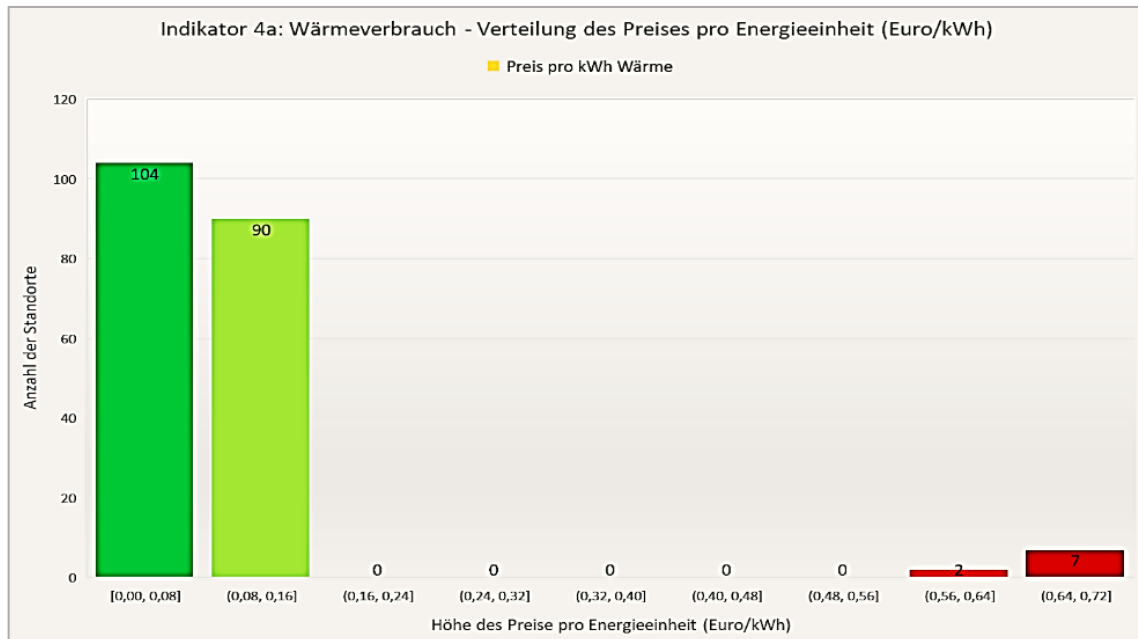


Abb. 93: Indikator 4a Preis pro Energieeinheit (Kilowattpreis) des Wärmeverbrauchs (eigene Darstellung)

Der höchste Wärmeverbrauch des CRONA-Klinikumsgebäude⁶⁰ ist nutzungs- und funktionsabhängig erwartungsgemäß hoch mit 17,4 GWh/a. Auffällig sind hingegen Gebäude mit einem erwartungsgemäß geringen Wärmeenergieverbrauch wie z.B. das Gebäude 4015: Personalwohngebäude, das hier auf Platz 13 liegt (s. Rangfolgenliste 9 (UNI) + 12 (UKT) im Anhang.

Die Übersichtskarte (Abb. 94) zeigt die Klassifizierung der Gebäude nach Wärmeverbrauch. Bei den Universitätsgebäuden beginnt die Rangfolgenliste des höchsten Wärmeenergieverbrauchs mit dem Naturwissenschaften Gebäude E-Bau auf der Morgenstelle mit 6,38 GWh/a, gefolgt von weiteren NWI-Gebäuden auf der Morgenstelle. Das Verwaltungs- und Lehrgebäude Neue Aula liegt auf Platz 10 dieser Rangfolgenliste und erreicht 2,34 GWh/a.

Erkennbar ist, dass der Kilowattpreis nicht linear mit dem Wärmeverbrauch verhält, sondern gebäudespezifisch abweichende Preise vorliegen. Dies kann durch eine interne Zuweisung der Zählerauswertung innerhalb zusammenhängender oder zusammengehörender Gebäudekomplexe verursacht sein. Die Geowissenschaften erreichen 1 GWh/a. Einzelne Gebäude beziehen noch Erdgaslieferung, die pauschal abgerechnet wird. Hier sind die Standorte aufgeführt, zu denen Daten vorliegen (s. Rangfolgenlisten 10 + 11 (UNI)).

⁶⁰ ergibt sich durch die hohen Anforderungen an Hygiene und Sterilisationsvorgänge mit Heißdampf)

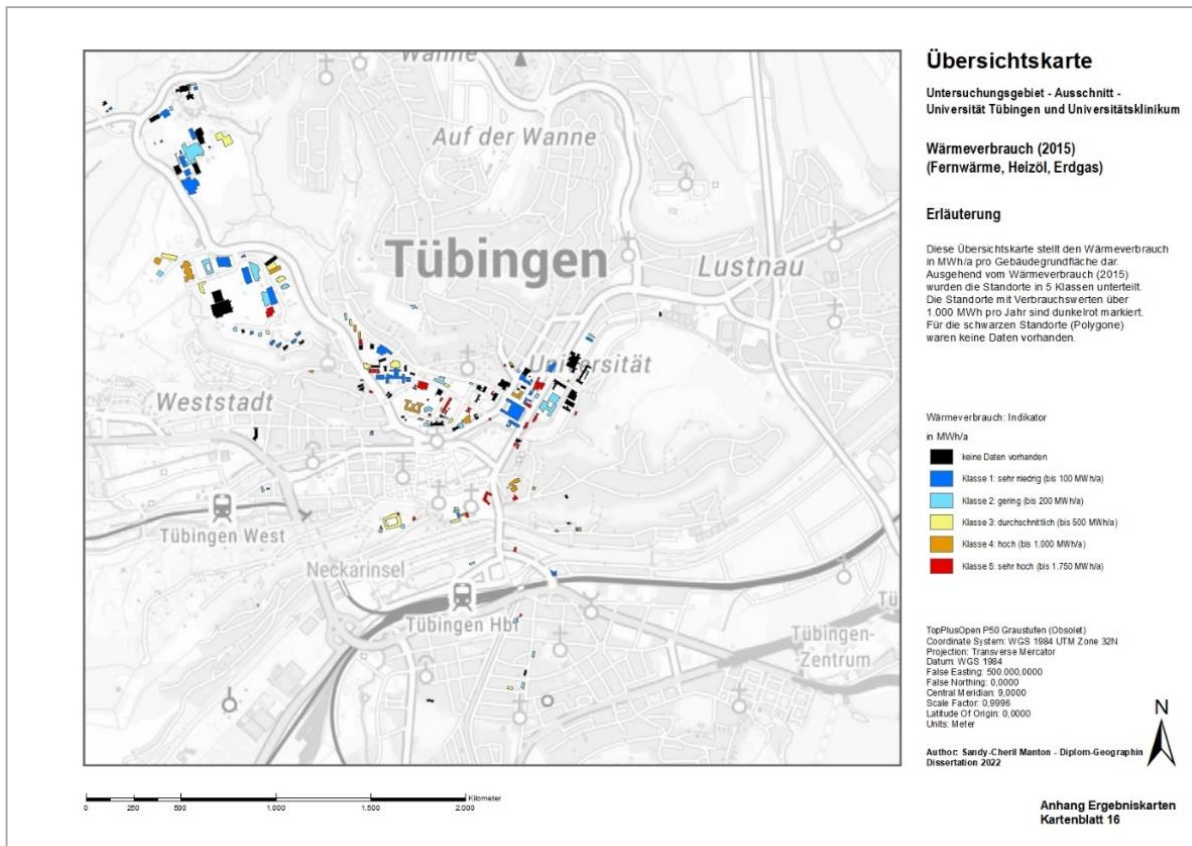


Abb. 94: Übersichtskarte Wärmeverbrauch im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung)

7.2.13. Verteilung Stromverbrauch - Indikator 2a Preis pro Energieeinheit - Strom

Für die Auswertung des Stromverbrauchs zeigt der Kilowattpreis eine geringe Verteilung. Die Kilowattpreise liegen überwiegend zwischen **0,01-0,33 Euro/kWh**, bis auf Ausreißer (**0,77-0,88 Euro/kWh**). Sie liegen bei 881 Teildachflächen unterhalb des Verbrauchspreises und bei 341 etwa gleich. Dies zeigt, dass Investitionen in PV-Anlagen hier rentabel sind. Es wird auch deutlich, dass die Rentabilität im Kilowattpreis nur an ausgewählten Standorten gegeben ist. Dazu ist eine Rangfolgenliste nach Kilowattpreis aufgestellt, die die günstigsten Standorte auflistet. Hier würde sich eine Investition aufgrund des günstigen Kilowattpreises besonders rentieren (Abb. 95, s. Rangfolgenlisten 15 (UNI) + 16 (UKT)).

In der Übersichtskarte (Abb. 96) sind alle Standorte nach ihrem Stromverbrauch in Klassen eingeteilt. Einzelne Standorte stechen durch einen hohen Stromverbrauch hervor. Die rot markierten Standorte zeigen den höchsten Stromverbrauch an. Der signifikante Ausreißer, das Gebäude 7078: Zentrales Möbel- und Gerätelager der Universität in der Eisenbahnstr. 128 weist einen **Kilowattpreis von 2,41 Euro/kWh** auf. Dies wäre ein wichtiger Standort für die Investition in PV-Anlagen sehr rentabel, der Brandschutz wäre besonders zu beachten.

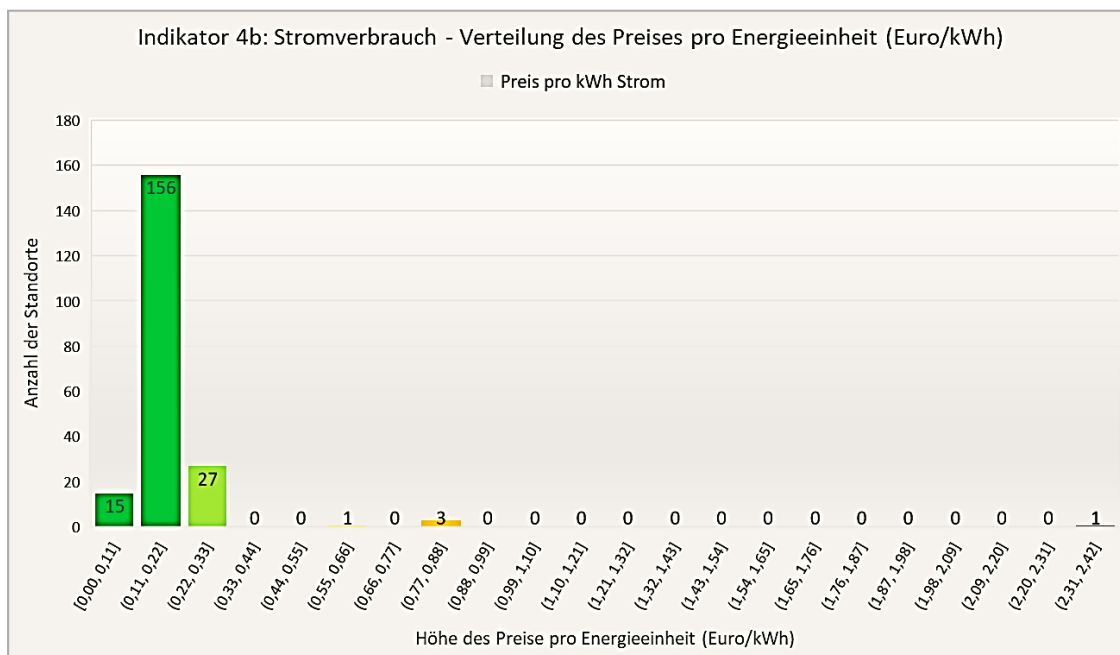


Abb. 95: Indikator 2a Preis pro Energieeinheit für Stromverbrauch (eigene Darstellung)

Die Universitätsgebäude weisen einen höheren Stromverbrauch als die Klinikumsgebäude auf, die dafür im Wärmeverbrauch weit höher liegen. Den höchsten Stromverbrauch verursacht das Gebäude der Naturwissenschaften (A-Bau NWI) mit 4,56 GWh pro Jahr, gefolgt von weiteren Gebäuden auf der Morgenstelle. Der 20. Platz verbraucht noch 463 MWh (Sportwissenschaftliches Institut), während das Geographische Institut mit insgesamt 357 MWh auf dem 28. Platz liegt. Darin sind Labor-, Lehr- und Verwaltungsgebäude und Datenverarbeitungsgebäude zu finden.

Der größte Stromverbraucher der Klinikumsgebäude liegt bei ca. 2,1 GWh (CRONA). Auf Platz 20 liegt die Psychiatrische Klinik, die noch 78 MWh pro Jahr verbraucht. Die kleineren Klinikumsgebäude weisen höhere Wärme- als Stromverbräuche auf. Die Gebäude mit dem höchsten Energieverbrauch verursachen auch den größten Anteil der Restemissionen, die bis 2030 durch entsprechende Maßnahmen zu kompensieren sind (s. Rangfolgenlisten 15 (UNI) + 16 (UKT) im Anhang).

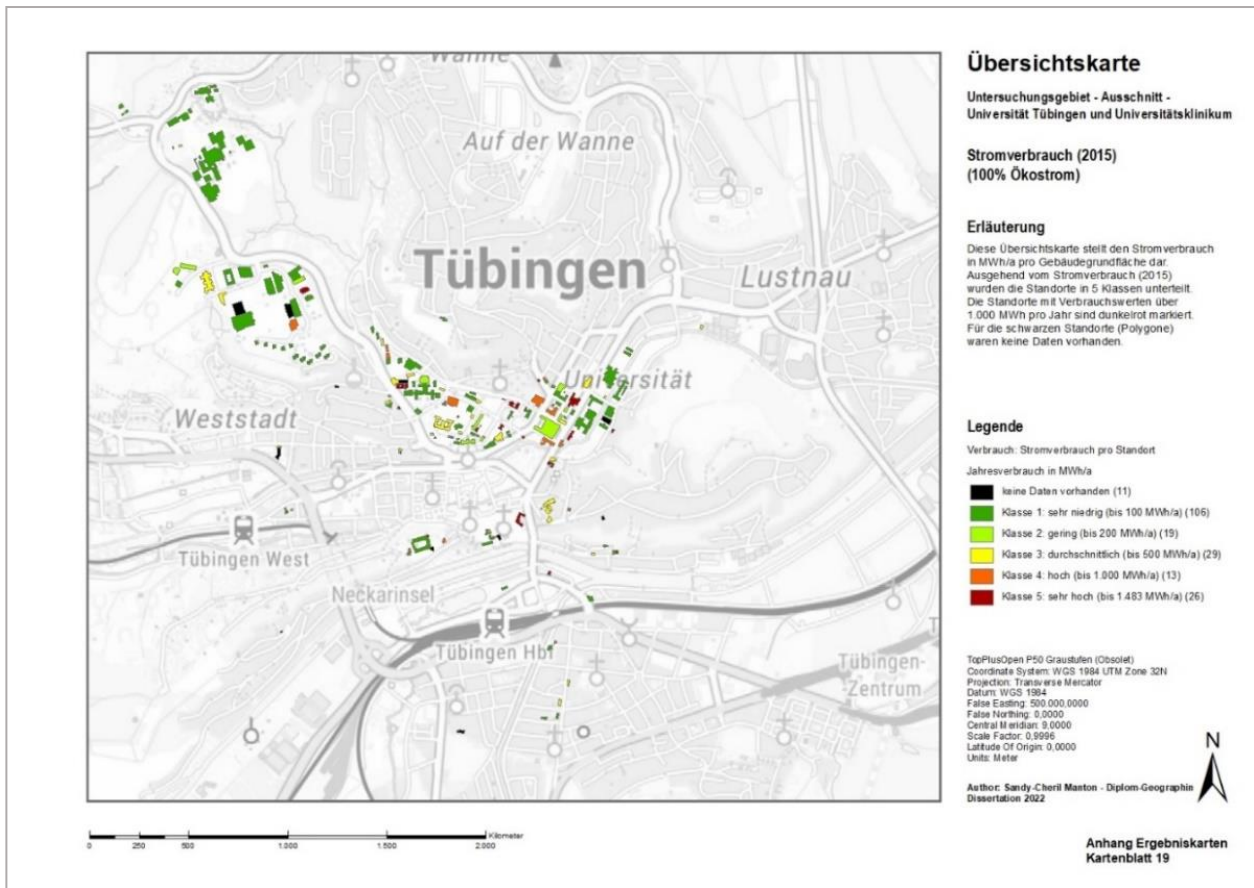


Abb. 96: Übersichtskarte Stromverbrauch im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung)

7.3. Ergebnisse der gewichteten Rangfolgenbildung mit Indikatoren

Durch die Gewichtung der Indikatoren ergibt sich eine neue Rangfolge unter den Untersuchungsflächen (unter 6.1. beschrieben). „**Tübingens next Top places for renewable energies**“ beinhaltet die 20 besten Standorte nach dieser Bewertung. Die Standorte mit dem höchsten Verbrauch, Kosten und CO₂-Werten erhielten die schlechtesten Bewertungen - „**Tübingens worst places**“.

7.3.1. „Tübingens next top places for renewable energies“

Davon sind die besten 20 Standorte als Top 20 aufgelistet, die im Verhältnis (60:30:10) den *höchsten Energieertrag*, den *niedrigsten kWh-Preis* und den *geringsten CO₂-Wert* vorweisen und in den Rangfolgenlisten 19-22, s. Anhang) aufgeführt. Die Kartenausschnitte zeigen jeweils für Erdwärme und Photovoltaik einzelne Quartiere oder Gebäudekomplexe (Abb. 97+99: Universität: Campus Wilhelmstraße und Morgenstelle, Abb. 98+100: Universitätsklinikum: Schnarrenberg- und Tal-Kliniken, im Anhang in DIN A4).

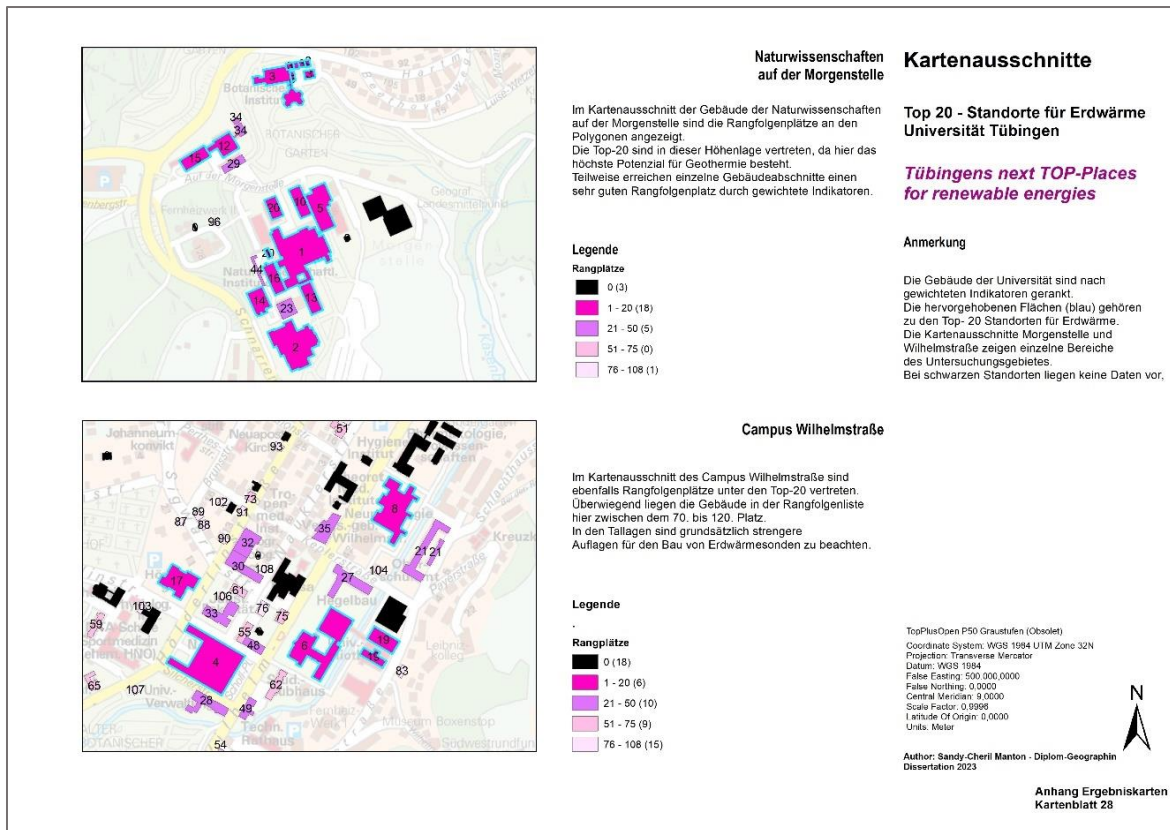


Abb. 97: Kartenausschnitt: „Tübingens next Top-Places for renewable energies“ -Indikatorenbewertung mit Ausweisung der Rangplätze für Erdwärme am Universitätsklinikum (eigene Darstellung)

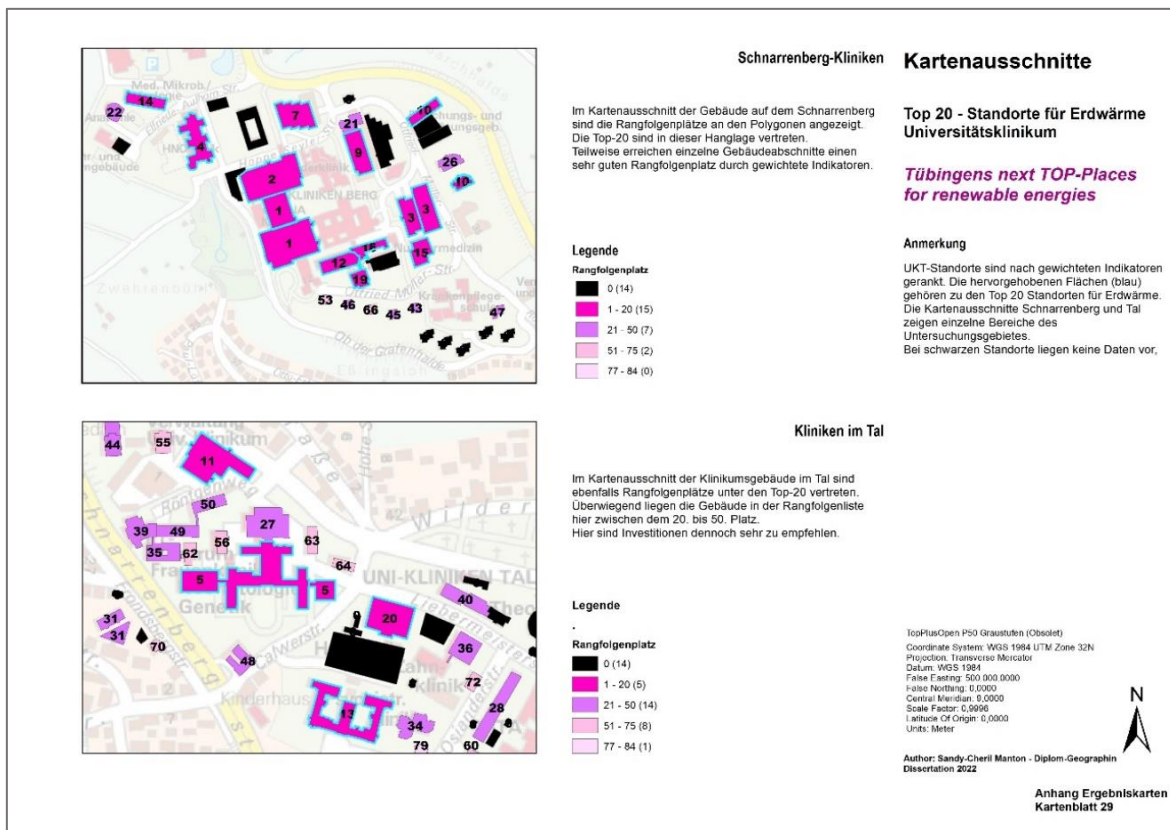


Abb. 98: Kartenausschnitt: „Tübingens next Top-Places for renewable energies“ -Indikatorenbewertung mit Ausweisung der Rangplätze für Erdwärme am Universitätsklinikum (eigene Darstellung)

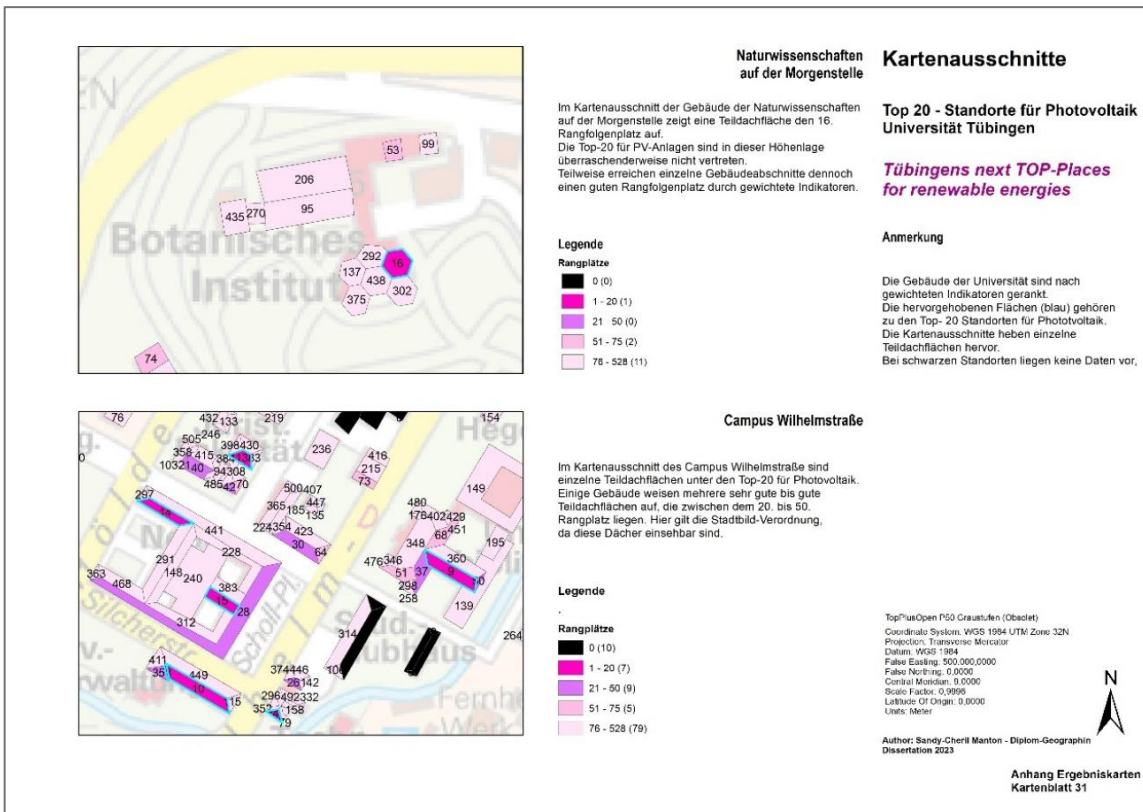


Abb. 99: Kartenausschnitt: Kartenausschnitt: „Tübingens next Top-Places for renewable energies“ - Indikatorenbewertung mit Ausweisung der Rangplätze für Photovoltaik der Universität (eigene Darstellung)

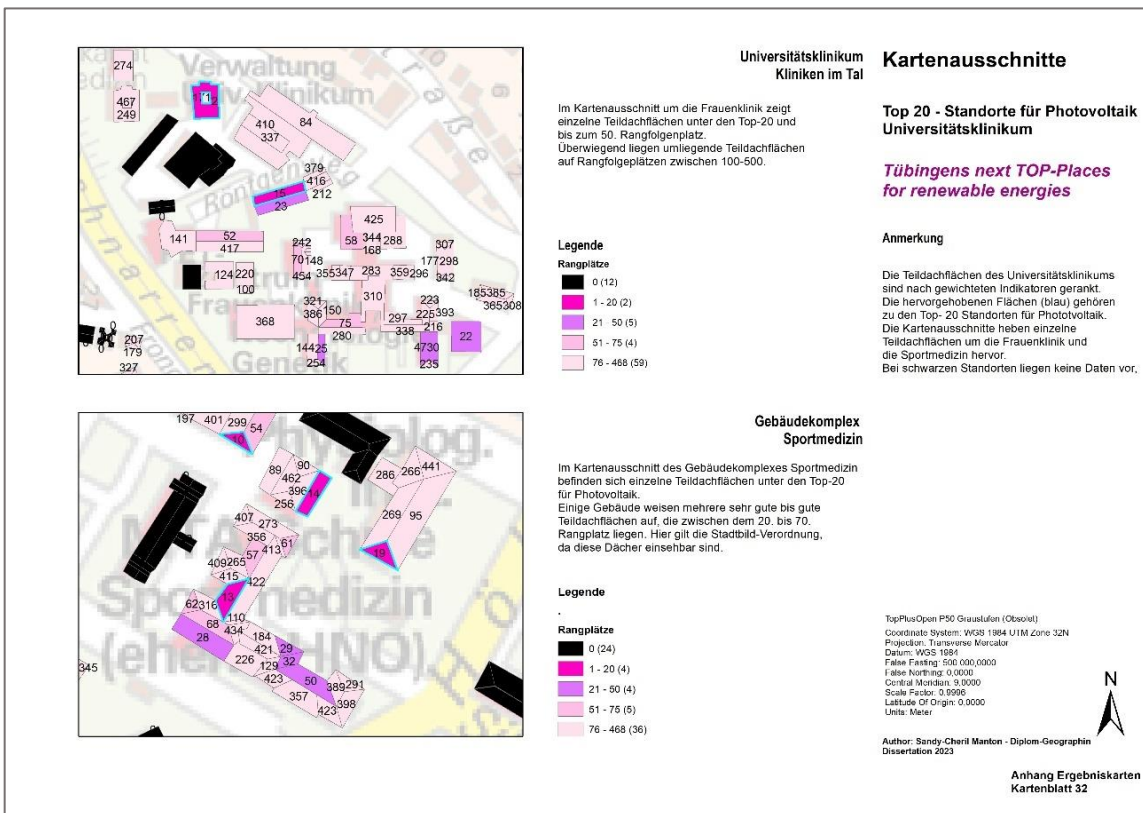


Abb. 100: Kartenausschnitt: Kartenausschnitt: „Tübingens next Top-Places for renewable energies“ - Indikatorenbewertung mit Ausweisung der Rangplätze für Photovoltaik am Universitätsklinikum (eigene Darstellung)

7.3.2. „Tübingens worst Places“

Die Rangfolgenbildung des Energieverbrauchs ist dem Energiemanagement bekannt. Hier dient die Rangfolgenbildung der Gegenüberstellung und des Abgleichs der Endbewertung. Die Sicht auf die Rangfolgenlisten 23+24 „Tübingens worst places“ steigert die Aufmerksamkeit auf die Gebäude, die am meisten CO₂-Emissionen verursachen und einen hohen Handlungsbedarf in Bezug auf die Erreichbarkeit der Klimaschutzziele 2030 signalisieren. Dieser kann durch Verbrauchsreduzierung und durch CO₂-Vermeidung und -Kompensationsmaßnahmen geschehen.

Die Rangfolgenliste sortiert die Gebäude nach ihrem Strom- und Wärmeverbrauch und zeigt die Punktezuweisung aufgrund der gewichteten Indikatoren an. In der Gewichtung wird der Kilowattpreis am Standort mitberücksichtigt, der Aussage über den teuersten Standort mitliefert. So ist die Dringlichkeit des Handlungsbedarfs nicht ausschließlich durch den Verbrauch bewertet, sondern auch über diesen Kostenfaktor, der zu Investitionen in erneuerbare Energien rät. Gebäude mit höchsten Verbrauchswerten haben funktions- und nutzungsbedingt herausragende Verbrauchswerte, die mit dem Energiepotenzial überwiegend nicht deckbar sind (Abb. 101). Das Ergebnis ist eine Standortliste mit den höchsten Strom- und Wärmeverbrauchern, die den höchsten Handlungsbedarf symbolisieren.

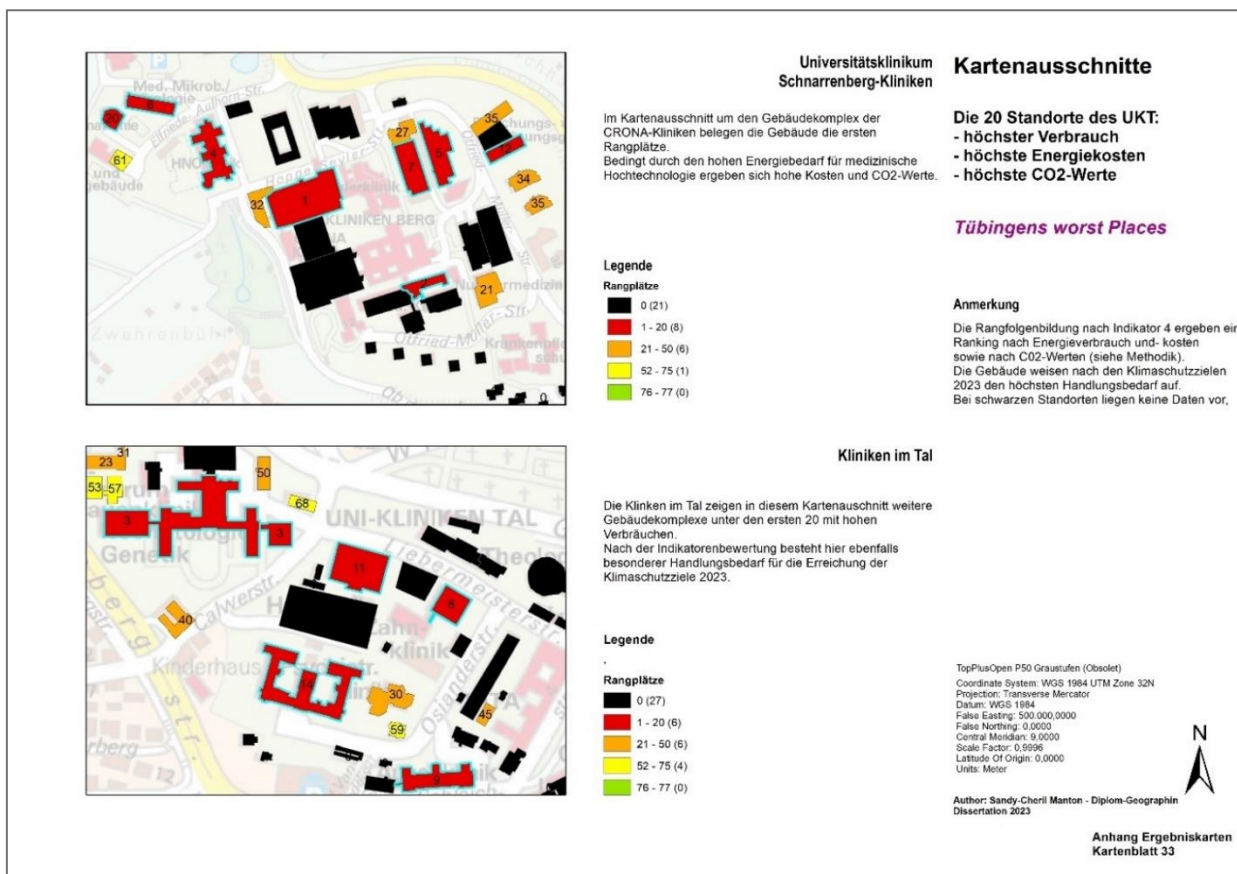


Abb. 101: Kartenausschnitt: Kartenausschnitt: „Tübingens worst Places“ -Indikatorenbewertung nach Verbrauch, Kosten und CO₂-Werten mit Ausweisung der Rangplätze des Universitätsklinikums (eigene Darstellung)

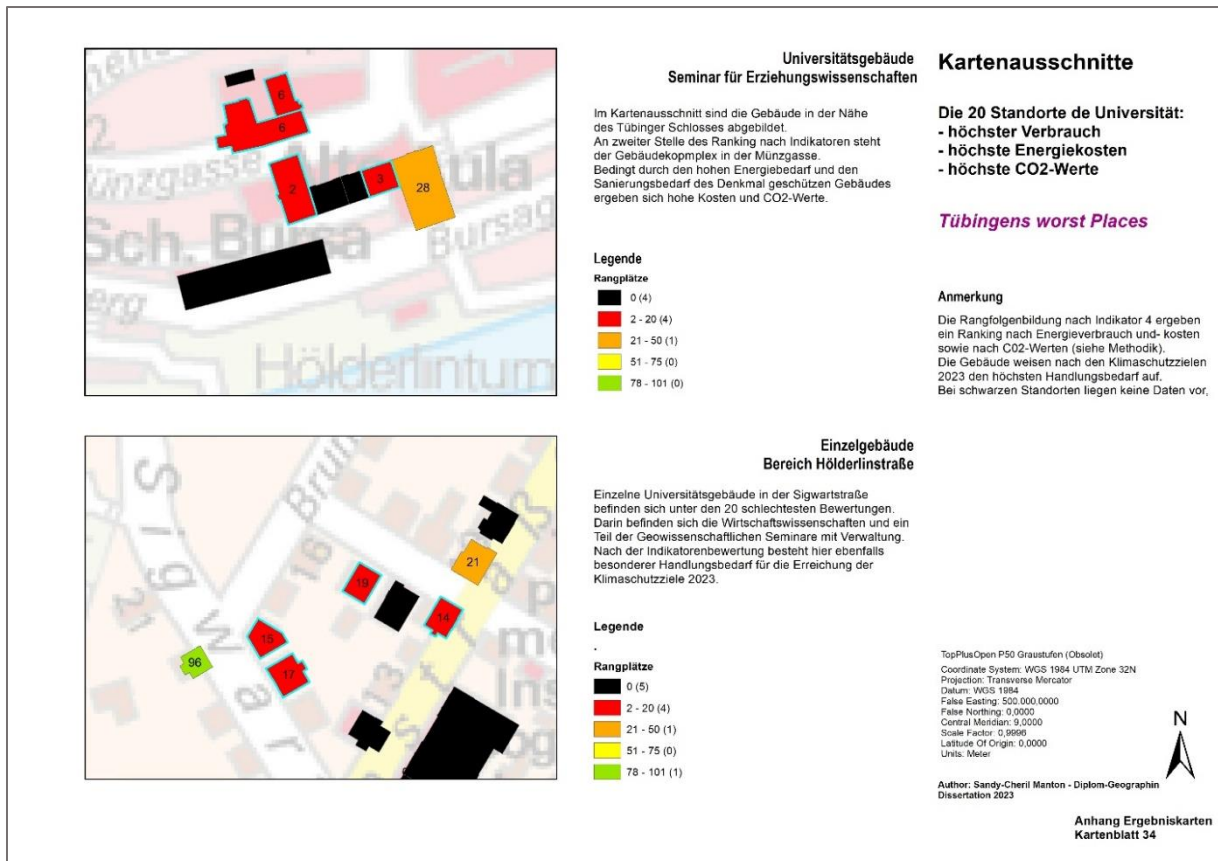


Abb. 102: Kartenausschnitt: Kartenausschnitt: „Tübingens worst Places“ -Indikatorenbewertung nach Verbrauch, Kosten und CO₂-Werten mit Ausweisung der Rangplätze der Universität Tübingen (eigene Darstellung)

7.4. Darstellung der Gesamtergebnisse

In den Gesamtergebnissen sind jeweils die Summen aller Untersuchungsflächen enthalten. Um darzustellen, welches Potenzial insgesamt bestimmt wurde, welche Gesamtkosten zu erwarten und welche CO₂-Emissionen zu kompensieren sind, werden die Gesamtwerte vorgestellt. Sie umfassen das Energiepotenzial und -ertrag, die Gesamtkosten und die CO₂-Emissionen. Der theoretische Deckungsgrad von Potenzial und Verbrauch macht deutlich, dass in beiden Fällen nur die Hälfte des Bedarfs gedeckt werden kann:

- **43 %** des jährlichen Strombedarfs mit Photovoltaik-Strom
- **51 %** des Wärmeenergieverbrauchs (2015) durch Erdwärme

Durch die Erschließung weiterer Flächen im Untersuchungsgebiet kann der Deckungsgrad erhöht werden.

7.4.1. Berücksichtigte Energieverluste bei Erdwärme: Was bleibt nutzbar?

Die Summe aller Gebäudegrundflächen ergibt das gesamte Wärmepotenzial, das theoretisch für die Wärmeversorgung zur Verfügung steht. Baulich ist die Umsetzung nach heutigen Gesichtspunkten nur schwer denkbar. Die Heizungsanlagen, die mit Wärmepumpen betrieben werden, benötigen eine Anpassung der

Wärmekesselleistung, um gebäudespezifische Anlagen zu konfigurieren. Für die Einschätzung des vorhandenen Potenzials ist eine Gesamtdarstellung hilfreich. Das gesamte Erdwärmepotenzial ergibt **63,1 GWh** pro Jahr und entspricht einer Heizlast von **56,79 MWh** pro Jahr. Abzüglich der Verluste, ergibt sich eine gesamte Nutzenergie von **56,8 GWh** pro Jahr. Die Entzugsleistung würde bei 1.800 Betriebsstunden eine Gesamtentzugsleistung von **23.6 MWh** pro Jahr ergeben. Dies würde eine Gesamtsondenlänge von **473.337,19 m** erfordern, die sich auf **2.435 Erdsonden** verteilt (Tab.23 + Abb. 103).

Tab. 23: Ergebnis: Gesamtes Energiepotenzial Erdwärme (eigene Darstellung)

Energiepotenzial	Kilowattstunden / pro Jahr	Einheit
Erdwärmepotenzial (Jahresarbeit kWh/a) auf 243.500,00 m ² Gebäudegrundfläche (laut Potenzialanalyse)	63.111.625,19 63,1	kWh/a GWh/a
Anzahl der Erdwärmesonden	2.435,00	Stück
entspricht Heizlast (kWh/a)	56.799.462,67	kWh/a
Nutzenergie Gesamt (kWh/a)	56.800.462,67	kWh/a
Entzugsleistung in kW	23.666,86	kW
erforderliche Sondenlänge (pro Erdsonde)	194,38	m ²
benötigte Gesamt-Sondenlänge (m)	473.337,19	m
Wärmeendenergieverbrauch (2015) summiert	138.554.492,69	kWh/a
Wärmeendenergieverbrauch (tba, 2015)	123.582.991,94	(123.582.991,94)
Deckungsgrad (theoretisch) Erdwärmepotenzial /= Wärmeverbrauch (2015)	51,07	% Deckung

Die jährlich verfügbare Erdwärme, die auf den Gebäudegrundflächen entzogen werden kann, stellt zunächst ein sehr hohes Wärmepotenzial dar.

➔ Als Nutzenergie bleiben nach allen Abzügen noch 51 % des Wärmeverbrauchs übrig.

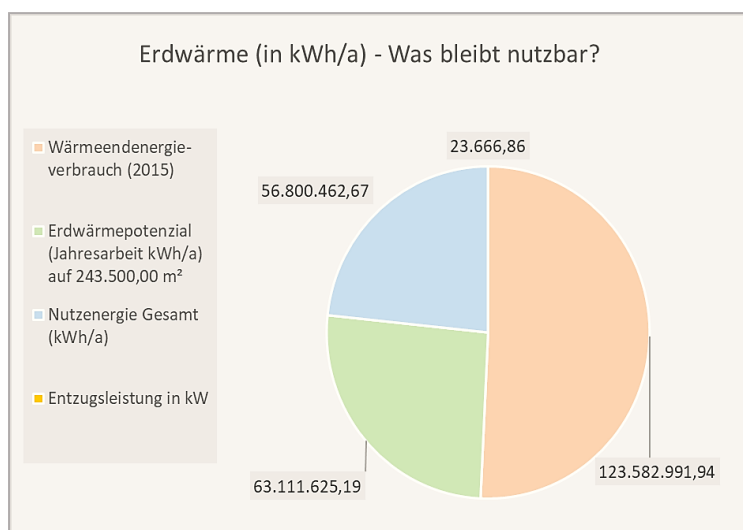


Abb. 103: Erdwärmepotenzial – Wieviel Energie bleibt nutzbar? (eigene Darstellung)

Was wäre für die Deckung des Bedarfs erforderlich?

Bei einer weiteren Berechnung wurde der Wärmeendenergieverbrauch (2015) als Berechnungsgrundlage herangezogen. Um Deckung des Wärmebedarfs zu erzielen, würde die erforderliche Heizlast und die Nutzenergie bei **ca. 111,2 GWh** pro Jahr liegen. Dies würde eine gesamte Entzugsleistung von **96,2 GWh** pro Jahr ergeben, für die eine Gesamtsondenlänge von **1.029.858,27 m** erforderlich wäre. In diesem Umfang scheinen Erdwärmesonden aktuell baulich wie wirtschaftlich nicht zusetzbar und würden den Untergrund Tübingens zu einem „Schweizer Käse“ umgestalten. Weiter ist anzumerken, dass:

- ➔ Die Anlagenkonfiguration über die Ausrichtung der Wärmekessel geschehen muss, die flächendeckend nicht berechnet werden kann, da die Parameter für die jeweiligen Heizungsanlagen in den Gebäuden nicht vorliegen. Hier sind Einzelbewertungen durch Heizungsfachleute erforderlich.
- ➔ Praktisch ist nur ein kleiner Teil des ausgewiesenen Wärmepotenzials nutzbar. Aber: bei Berücksichtigung der Gesamtfläche aller Flurstücke erhöht sich das Wärmepotenzial erheblich und erweitert die Standortmöglichkeiten für große Sondenfelder.
- ➔ Große Erdwärmesondenanlagen sind außerhalb des Stadtgebiets auf den Höhenlagen von Tübingen wegen des hohen Erdwärmepotenzials denkbar und sind in weiterführenden Arbeiten zu evaluieren.

Tab. 24: Berechnung zur Deckung des Wärmeendenergiebedarfs durch Erdwärme (eigene Darstellung)

Berechnung zur Deckung des Wärmebedarfs durch Erdwärme	Kilowattstunden / pro Jahr	Einheit
Wärmeendenergieverbrauch (2015)	123.582.991,94	kWh/a
entspricht Heizlast (kWh/a)	111.224.188,75	kWh/a
Nutzenergie Gesamt (kWh/a)	111.224.692,75	kWh/a
gesamte Entzugsleistung P_e in kW über Wärmebedarf	92.687.243,96	kW
benötigte Gesamt-Sondenlänge (m)	1.029.858,27	m

7.4.2. Berücksichtigte Energieverluste bei Photovoltaik-Strom: Was bleibt nutzbar?

Die Summe aller Teildachflächen ergibt das gesamte Solarstrompotenzial, das theoretisch für die Stromversorgung zur Verfügung steht, wenn in diesem Umfang PV-Anlagen installiert werden. Baulich ist die Umsetzung nach heutigen Gesichtspunkten möglich, jedoch bestehen immer noch Einschränkungen durch die geltende Stadtbildsatzung der Stadt Tübingen und den Landesdenkmalschutz. Da diese Faktoren variabel sind und in Zukunft durch neue gesetzliche Regelungen und bauliche Maßnahmen behebbar sind, werden diese Faktoren hier nicht weiter berücksichtigt. Die angestrebte Energiewende und die Klimaschutzziele können in naher Zukunft neue Regelungen bewirken, die die Stromversorgung flexibler gestalten.

Die jährliche Sonneneinstrahlung stellt **358,2 GWh** Solarenergie zur Verfügung. Davon bleiben als nutzbarer Solarstrom **41,8 GWh_{el}** des Jahresertrags auf den untersuchten Flächen verfügbar. Bei einer benötigten Modulanzahl von 101.385 PV-Modulen ergibt das eine Gesamtmodulleistung von **30,2 MWp (Installierte Leistung)** im Untersuchungsgebiet (Tab. 25 + Abb.104).

➔ **Von der jährlichen Solareinstrahlung bleibt ein Jahresertrag von 41 GWh_{el} nutzbar.**

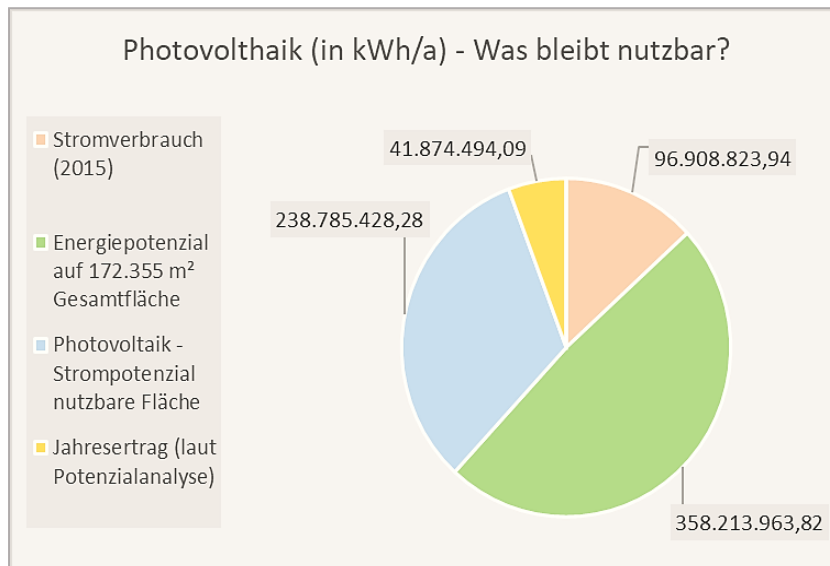


Abb. 104: Photovoltaikpotenzial - Wieviel Energie bleibt nutzbar? (eigene Darstellung)

Tab. 25: Ergebnis: Gesamtes Energiepotenzial Photovoltaik-Strom (eigene Darstellung)

Photovoltaik - Strompotenzial	Kilowattstunden / pro Jahr	Einheit
Sonneneinstrahlung (kWh/m² pro Jahr) auf 258.559 m² Gesamtdachfläche (laut Potenzialanalyse)	1.789.347,10	kWh/m²
Direkte Sonneneinstrahlung (kWh/m²)	1.306.742,00	kWh/m²
Diffuse Sonneneinstrahlung (kWh/m²)	482.605,10	kWh/m²
Energiepotenzial auf 172.355 m² Gesamtfläche	358.213.963,82	kWh/a
Anzahl erforderliche PV-Module (1,70m²)	101.385,74	Stück
Installierte Leistung (Modulleistung 300 Wp)	30.223,20	Wp
Photovoltaik - Strompotenzial nutzbare Fläche	238.785.428,28	kWh/a
Jahresertrag	41.874.494,09	kWh/a
Gesamtertrag 20 Jahre (kWh)	837.489.881,76	kWh
Stromverbrauch (2015)	96.908.823,94	kWh/a
Deckungsgrad (theoretisch) PV-Stromertrag /= Stromverbrauch (2015)	43,21	% Deckung

Im direkten Vergleich von Energieverbrauch und -potenzial ist anzumerken, dass das Potenzial aufgrund der beschränkten Untersuchungsfläche in dieser Arbeit keine 100 % Deckung erreicht. Dies lässt sich durch die Erschließung weiterer Dachflächen und Flurstücke, die Ausweitung des Untersuchungsgebietes und durch Flächenumnutzungen erreichen, sodass ein 100 % Deckungsgrad durch erneuerbare Energien im Untersuchungsgebiet denkbar ist (s. Abb. 104).

Was wäre für die Deckung des Bedarfs erforderlich?

Für die Deckung des Bedarfs wäre die PV-Fläche insgesamt zu verdoppeln oder durch großflächige PV-Anlagen beispielweise in Kombination mit landwirtschaftlicher oder Grünlandnutzung zu errichten.

- ➔ Diese Flächen können in weiterführenden Arbeiten im Untersuchungsgebiet evaluiert werden und sind auch außerhalb des Stadtgebiets / innerhalb des Landkreises denkbar.
- ➔ Eine Erhöhung des Jahresertrags kann durch die Vergrößerung der PV-Fläche, leistungsstärkere PV-Module und die Verringerung von Verlusten erreicht werden.

7.4.3. CO₂-Emissionen als Gesamtergebnis

Die CO₂-Emissionen des Energiesektors der Universität Tübingen und des Universitätsklinikums verteilen sich auf fossile Energieträger, Fernwärme und Ökostrom. Basierend auf den geltenden CO₂-Äquivalenten sind die CO₂-Emissionen für den Wärmeendenergieverbrauch und den Stromverbrauch (2015) berechnet (s. Tab.26).

Tab. 26: Aufstellung von Energieverbrauch (2015) und -potenzial mit CO₂-Emissionen (eigene Darstellung).

Einheiten	Stromverbrauch	Wärmeendenergieverbrauch*	Strompotenzial (Jahresertrag)	Wärmepotenzial (Nutzenergie)
Strommenge in kWh/a	96.908.823,94	123.582.991,94	41.874.494,09	56.800.462,67
CO ₂ -Emission/Reduktion in CO ₂ kg/a	3.876.352,96	13.835.213,93*	5.401.809,74	5.459.155,58
*addiert aus den CO ₂ -Emissionen für Fernwärme, Erdgas und Heizöl (Verbrauchsdaten 2015, tba)				
** ermittelt aus CO ₂ -Emissionen für Ökostrom (Verbrauchsdaten 2015, tba)				

Diese Verbrauchs- und Potenzialwerte sind in Abbildung 105 dargestellt. Dabei ist das Verhältnis der CO₂-Emissionen zu erneuerbarem Energiepotenzial erkennbar.

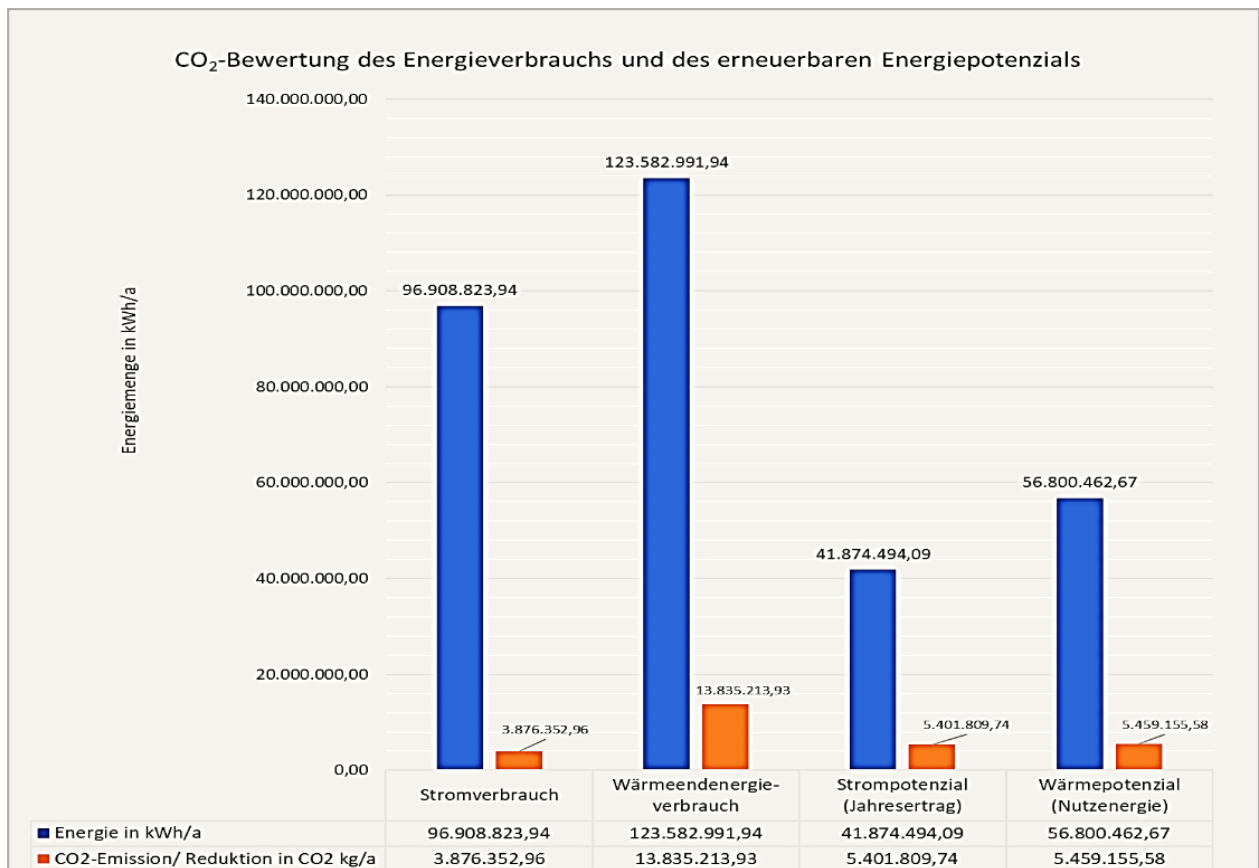


Abb. 105: CO₂-Bewertung des Energieverbrauchs und des erneuerbaren Energiepotenzials (eigene Darstellung)

7.4.4. CO₂-Emissionen des Stromverbrauchs und -potenzials

Die CO₂-Emissionen des Stromverbrauchs lagen im Jahr 2015 insgesamt bei **3.876 t CO₂** pro Jahr. Diese wurden vollständig durch den Bezug von Ökostrom (96,91 GWh/a) verursacht. Der Bezug von 100 % Ökostrom des Landes Baden-Württembergs wird mit einem geringeren CO₂-Äquivalent (0,040 kg/kWh) als für Solarstrom (0,129kg/kWh) berechnet. Ökostrom verursacht **3.876 t CO₂** während selbst produzierter PV-Solarstrom bei selbem Stromverbrauch von **96,91 GWh/a** dann **12.501 t CO₂** verursachen würde. Somit würden die CO₂-Emissionen von Universität und Universitätsklinikums in Tübingen insgesamt um **+ 8.625 t CO₂** in der CO₂-Bilanz ansteigen, wenn das PV-Potenzial ausgebaut wird (Tab. 27).

Tab. 27: Aufstellung des Stromverbrauchs (2015) und dessen CO₂-Emissionen (eigene Darstellung)

Energiemedium	Strommenge in kWh/a	CO ₂ -Emissionen in kg/kWh pro Jahr	Veränderung
Stromverbrauch 100% Ökostrom	96.908.823,94 kWh/a 96,90 GWh/a	3.876.352,96 kg 3.8 Mt	
Solarstrompotenzial (0,129kg/kWh)	41.874.494,09 kWh/a 41,8 GWh/a	5.401.809,74 kg 5.4 Mt	
100% Solarstrom (0,129kg/kWh)	96.908.823,94 kWh/a 96,90 GWh/a	12.501.238,29 kg 12.5 Mt	12.501.238,29 kg -3.876.352,96 kg = + 8.625 t CO₂

8,6 Mt

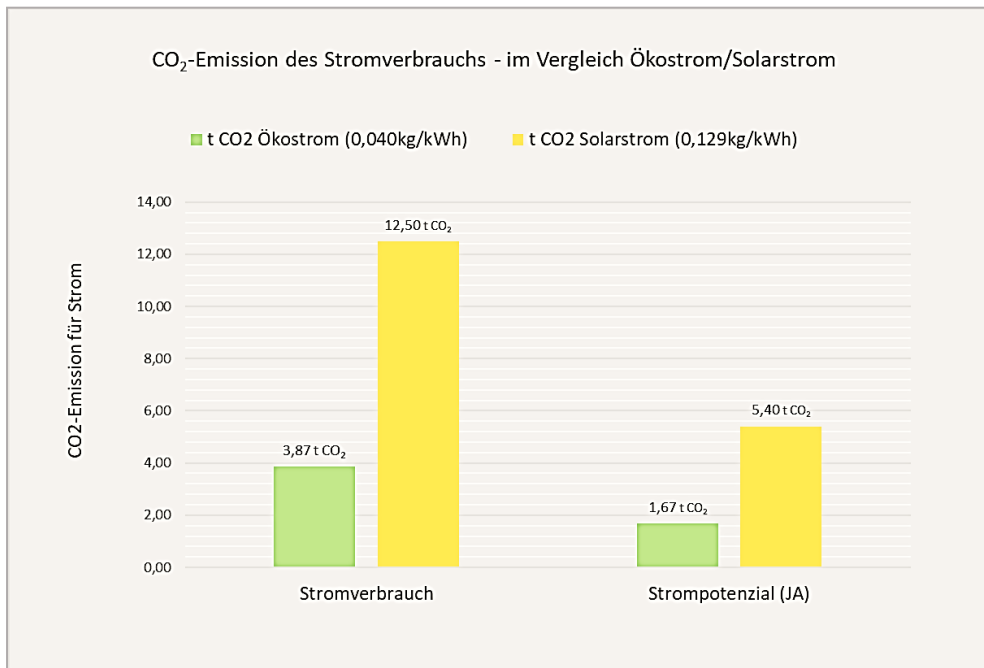


Abb. 106: CO₂-Emission des Stromverbrauchs – im Vergleich Ökostrom/Solarstrompotenzial (eigene Darstellung)

Bei einer teilweisen Nutzung des PV-Strompotenzials sind die besten Standorte vorzuziehen und die Standorte, die einen hohen Stromverbrauch aufweisen. Diese sollten nicht im Stadtgebiet liegen, wo die geltende Stadtbildsatzung PV-Anlagen untersagt. Zusätzlich kann das Solarpotenzial für den erforderlichen Antriebstrom der Wärmepumpen eingesetzt werden oder durch Energiespeicherung und Umwandlung in Wärme genutzt werden.

7.4.5. CO₂-Emissionen des Wärmeverbrauchs und -potenzials

Die CO₂-Emissionen des Wärmeverbrauchs lagen im Jahr 2015 insgesamt bei **13.835 t CO₂** pro Jahr. Davon fielen **11.764 t CO₂** auf Fernwärme (129,28 GWh/a), die mit dem CO₂-Äquivalent Fernwärme aus Holzhackschnitzel der Stadtwerke Tübingen (0,091 kg/kWh) berechnet sind. Weitere **2.028 t CO₂** wurden durch die Nutzung von **9,13 GWh/a Erdgas** verursacht und **41,9 t CO₂** ergibt die Nutzung von **144,51 MWh/a Heizöl** in der CO₂-Bilanz zu Buche (vgl. Tab.26).

Durch das Ersetzen der fossilen Brennstoffe durch Erdwärme würden sich die CO₂-Emissionen um **1.258 t CO₂** reduzieren. Dies entspricht der Nutzung von **16,3 %** des berechneten Erdwärmepotenzials im Untersuchungsgebiet. Die Abbildung 107 zeigt im Vergleich die CO₂-Emissionen, die sich aus dem Wärmeenergieverbrauch von Universität und Klinikum ergeben. Diese Werte sind bis 2030 zu reduzieren oder zu kompensieren.

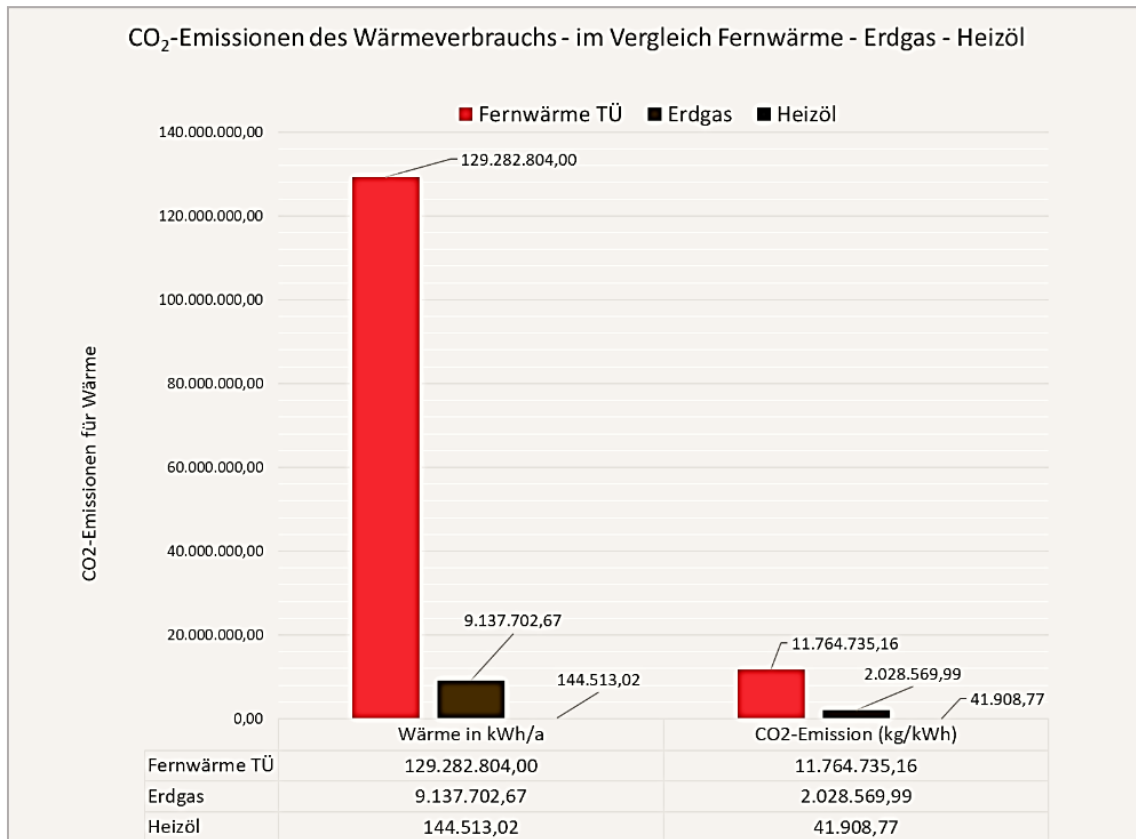


Abb. 107: CO₂-Emissionen des Wärmeverbrauchs - im Vergleich Fernwärme - Erdgas – Heizöl (eigene Darstellung)

Der Ersatz von fossilen Brennstoffen durch Fernwärme würde dann insgesamt **13.023 t CO₂** verursachen. Eine Wärmeversorgung durch 100 % selbst gewonnene Erdwärme würden im Vergleich dazu nur **12.124 t CO₂** verursachen. Dies sind **898,58 kg CO₂** weniger als durch Fernwärme (s. Abb.91). Der Vergleich der beiden CO₂-Emissionen am Beispiel des Fernwärmeverbrauchs im Untersuchungsgebiet zeigt folgende Werte:

- Fernwärme berechnet mit dem CO₂-Äquivalent der Stadtwerke Tübingen aus Holzhackschnitzel (0,091 kg/kWh) ergibt **13.023,02 t CO₂**.
- Fernwärme berechnet mit dem CO₂-Äquivalent für Fernwärme-Mix (0,295 kg/kWh, GEMIS 2014) ergibt **38.138,43 t CO₂**.
- **Das ergibt eine Erhöhung der Gesamtemissionen um + 26.373,7 t CO₂ für Wärme.**

In Zahlen ausgedrückt, listet Tab. 28 nochmals die Gegenüberstellungen auf. Darin ist erkennbar, wie sich die CO₂-Emissionen je nach Heizmittel ergeben. Die Erreichung der Klimaneutralität am Beispiel des vorgeschlagenen Stufenplans bis 2030 wird in dieser Arbeit anhand dieser CO₂-Werte simuliert.

Tab. 28: Aufstellung des Wärmeenergieverbrauchs (2015) und dessen CO₂-Emissionen mit weiteren Angaben zur Erdwärmenutzung (eigene Darstellung)

Energiemedium	Wärmemenge in kWh/Jahr	CO ₂ -Emissionen in kg/kWh pro Jahr	Veränderung
Wärmeenergieverbrauch	138.565.019,69 kWh/a 138,56 GWh/a	13.835.213,93 kg CO ₂ 13.835 t CO ₂	CO ₂ fossil 2.070.478,77 CO ₂ Erdw - 1.258.284,89 = 812.193,87 kg CO₂
Fernwärme Bedarf bisher (0,091 kg/kWh)	129.282.804,00 kWh/a 129,28 GWh/a	11.764.735,16 kg CO ₂ 11.764 t CO ₂	11.764.735,16 kg CO ₂ 11.764 t CO₂
Verbrauch Fossiler Brennstoffe	Erdgas 9.137.702,67 Heizöl +144.513,02 = 9.282.215,69 kWh/a	2.028.569,99 kg CO ₂ +41.908,77 kg CO ₂ = 2.070.478,77 kg CO₂ 2.070 t CO₂	13.835.213,93 kg CO ₂ -1.258.284,89 kg CO ₂ = 13.023.020,06 kg CO₂ 13.023 t CO₂
Fossil ersetzen durch Erdwärme (0,0875 kg/kWh)	9.282.215,69 kWh/a	812.193,87 kgCO₂	1.258.284,89 kg CO ₂ 1.258 t CO ₂ Reduktion
100% Erdwärmenutzung (0,0875 kg/kWh)	138,56 GWh/a Siehe oben	12.124.439,22 kg CO ₂ 12.124 t CO ₂	13.023.020,06 kg CO ₂ -12.124.439,22 kg CO ₂ = 898.580,84 kg CO₂
100% Fernwärme Bedarf neu (s.o.) (0,091 kg/kWh)	138.565.019,69 kWh/a 138,565 GWh/a	13.023.020,06 kg CO₂ 13.023 t CO₂	11.764.735,16 kg CO ₂ + 1.258.284,89 kg CO ₂ = 13.023.020,06 kg CO₂
100% Fernwärme GEMIS (0,295 kg/kWh)	138.565.019,69 kWh/a	38.138.427.18	+26.373.692.016 kg CO₂ + 26.373,7 t CO₂

7.4.6. Anfangsinvestition und Betriebskosten für Photovoltaik und Erdwärme

Erdwärmepumpen

Die Berechnung der Anfangsinvestitionen für Erdwärme auf den Gebäudegrundflächen ergibt 58 Mio. Euro (s. 6.2.8.ff). Unter Berücksichtigung der Betriebskosten auf 20 Jahre ergibt sich eine Gesamtsumme von **149.886.940,58 Mio. Euro**. Die Gesamtkosten für 20 Jahre sind vergleichbar mit den Wärmekosten der Universität Tübingen für ca. 12 Jahre, in denen die Wärmekosten bei ca. **12,7 Mio. Euro** pro Jahr lagen.

Tab. 29: Anfangsinvestitionen und Betriebskosten auf 20 Jahre für Erdwärmesonden (eigene Darstellung)

Kostenkalkulation Erdwärmesondenfelder	Anfangsinvestitionen (plus 1. Jahr Betriebskosten)	in 20 Jahren (kWh) 837.489.881,76 kWh
Jahresertrag (real) kWh 41.874.494,09 kWh/a	58.591.125,53 €	58.591.125,53 €
Antriebsstrom (enthalten in Betriebskosten)	4.389.255,75 €	87.785.115,06 €
Betriebskosten (nach Klassen interpoliert)	4.564.790,75 €	91.295.815,06 €
Gesamtkosten im 1. Jahr (Anfinv+Bk+Zusatzk)	63.155.916,28 €	
Gesamt Gesamtkosten in 20 Jahren		149.886.940,58 €
Universität Tübingen	60.903.501,34 €	
Universitätsklinikum Tübingen	62.113.150,93 €	

Photovoltaik-Anlagen

Die Berechnung der Anfangsinvestitionen für die im Untersuchungsgebiet möglichen PV-Anlagen ergibt eine Summe von **41 Mio. Euro**. Hinzu kommen Betriebskosten (inklusive Zusatzkosten) im ersten Jahr und aufgerechnet auf 20 Jahre, ergeben **73 Mio. Euro Gesamtkosten**. Diese erforderliche Investitionssumme ist vergleichbar mit den Stromkosten für 5 Jahre, die die Universität Tübingen von 2015-2020 in Höhe von **ca. 14 Mio. Euro pro Jahr** aufbrachte (s. 6.3.5ff). Hier ist eine Aufstellung der flächendeckenden Kostenkalkulation aller Untersuchungsflächen für Photovoltaik, die sich auf Universität und Universitätsklinikum verteilen:

Tab. 30: Anfangsinvestitionen und Betriebskosten auf 20 Jahre für PV-Anlagen (eigene Darstellung)

Kostenkalkulation Photovoltaik - Strompotenzial	Anfangsinvestitionen (plus 1. Jahr Betriebskosten)	in 20 Jahren (837.489.881,76 kWh)
Jahresertrag (real) kWh 41.874.494,09 kWh/a	41.361.856,80 €	41.361.856,80 €
Betriebskosten (2,5 % der Investitionskosten)	1.034.046,42 €	
Betriebskosten (2,5 % von IK für 20 Jahre)		20.680.928,40 €
Versicherung (0,35 % der Investitionskosten)	144.766,50 €	
Instandhaltung (2,5 €/m ²)	430.889,39 €	
zusätzliche jährliche Kosten	575.655,89 €	
Gesamte Zusatzkosten (20 Jahre)		11.513.117,71 €
Gesamtkosten im 1. Jahr	42.971.559,11 €	
Gesamt Gesamtkosten in 20 Jahren		73.555.902,91 €
Universität Tübingen	31.268.838,06€	
Universitätsklinikum Tübingen	31.538.639,71 €	

- ➔ Rechnerisch würden die Anfangsinvestitionen in erneuerbare Energien für Photovoltaik **41 Mio. Euro** liegen und für Erdwärme bei **58 Mio. Euro**.
- ➔ Auf 20 Jahre ergeben sich Gesamtkosten von **73 Mio. Euro** für diese Photovoltaikanlagen und **150 Mio. Euro** für die Erdwärmesonden.

7.4.7. EEG-Einspeisevergütung und EEG-Umlage für das Energiepotenzial

Für die Errichtung neuer Anlagen zur Gewinnung erneuerbarer Energien sind jeweils die Anfangsinvestitionen und die Betriebskosten kalkuliert. Hier werden die Gesamtwerte der möglichen EEG-Einspeisevergütung und EEG-Umlagezahlung aufgestellt, um die Höhe dieser Werte zu verdeutlichen, die sich für den *selbst produzierten und selbst genutzten PV-Strom* ergeben. Es wird darauf hingewiesen, dass die **EEG-Umlage** laut aktueller Pressemitteilungen der neuen großen Koalition an 2023 abgeschafft werden soll und dann nicht mehr für selbst produzierte Energie zu entrichten ist. Diese Kosten würden dann nicht entstehen. Auch wenn die aktuellen Entwicklungen die Abschaffung der EEG-Umlage ankündigen, werden die hier berechneten Sätze vorgestellt (s. Tab.31).

Anhand des berechneten Jahresertrags von PV-Strom (41,8 GWh/a) ergäbe sich nach den bisherigen gesetzlichen Bestimmungen eine zu entrichtende **EEG-Umlage** für das gesamte Untersuchungsgebiet. Für jeden Standort wurde die anfallende EEG-Umlage abhängig von Strompotenzial, nutzbarer Teildachfläche und dem sich daraus ergebenden Jahresertrags (nach Anlagenkonfiguration) berechnet und steht in der Berechnungstabelle zur Verfügung.

- Bei einem Strompotenzial von **41,8 GWh pro Jahr** ergeben sich mit den beiden Sätzen für die EEG-Umlage jeweils **2,7 Mio. Euro** (6,500 ct/kWh) und **1,5 Mio. Euro** (3,723 ct/kWh) pro Jahr an zusätzlichen Kosten für die eigene PV-Stromproduktion und -nutzung.
- Für **privilegierte Letztverbraucher**, zu den die Universität zählt, sind gesetzlich bis zu **13 % Begünstigung** möglich. Dann läge der Gesamtbetrag der EEG-Umlage bei **1,3 Mio. Euro**.

Dem gegenübergestellt, wird die **EEG-Einspeisevergütung** für *selbst produzierten* und in das lokale Stromnetz *eingespeisten* PV-Strom. Ebenso wurde für dieselbe Strommenge des jährlichen Gesamtertrags (41,8 GkWh/a) die **erzielbare EEG-Einspeisevergütung** pro Standort berechnet. Die EEG-Einspeisevergütung wird nur für Strom vergütet, der in das öffentliche Netz eingespeist wird, nicht aber für die selbst genutzte Strommenge, die nach EEG noch einer EEG-Umlagezahlung unterliegen würde. Allerdings ist dies eine sehr theoretische Darstellung der möglichen Einnahmen, da das Solarpotenzial in dieser Höhe baulich wahrscheinlich nicht umgesetzt wird (s. Tab. 31):

Die Gesamtwerte im Untersuchungsgebiet der Einspeisevergütung für 20 Jahre ergibt folgende Werte:

- Das verfügbare Strompotenzial im Untersuchungsgebiet ergibt eine **EEG-Einspeisevergütung** von über **2,4 Mio.** Euro pro Jahr. Dies entspricht 17 % der jährlichen Stromkosten von 2015 in Höhe von ca. **14 Mio. Euro**.
- Auf 20 Jahre hochgerechnet würde das eine Summe von **48,3 Mio. Euro** ergeben.
- Für Erdwärme gibt es keine Einspeisevergütung nach dem EEG. Allerdings sind Konditionen mit den Netzbetreibern unter Umständen Verhandlungssache, wenn selbstgewonnene Erdwärme in das lokale Fernwärmenetz in Tübingen eingespeist wird. Die rechtlichen Rahmenbedingungen sind dafür abzuklären (s. Tab.31).

Tab. 31: EEG-Umlage und EEG-Einspeisevergütung als Gesamtwerte (eigene Darstellung)

PV-Strom Potenzial	EEG-Umlage* (EEG 10/2021)	EEG-Umlage** (EEG 01/2022)	Privil.Letztverbr. (DIN EN ISO 50001, EMAS für 2022) ***	EEG-Einspeisevergütung*** * (EEG 01/2021) 1 Jahr	EEG-Einspeisevergütung (20 Jahre)
Strommenge PV _{el} kWh/a	6,500 ct/kWh	3,723 ct/kWh	Begünstigung 13%	klassif. nach Anlagengröße	klassif. nach Anlagengröße
Universität Tübingen 17.490.506,81 kWh/a	1.136.882,94	651.171,57	566.519,26	1.006.165,99	20.123.319,76
Universitäts-Klinikum Tübingen 19.231.502,52 kWh/a	1.250.047,66	715.988,84	622.910,29	1.090.533,08	21.810.661,51
Unzuordenbare Standorte 5.152.484,76 kWh/a	334.911,51	191.827,01	166.889,50	318.964,31	6.379.286,18
Gesamtwerte 41.874.494,09 kWh/a	2.721.842,12 Mio. Euro	1.558.987,41 Mio. Euro	1.356.319,05 Mio. Euro	2.415.663,37 Mio. Euro	48.313.267,44 Mio. Euro
*EEG Satz für EEG-Umlage ** EEG Satz für EEG-Umlage			*** EEG Satz für Einspeisevergütung **** EEG Satz für Einspeisevergütung (Quelle: BNA 2020)		

7.5. Klimaneutrale Universität Tübingen bis 2030 - 2040 – 2050

Mit dem neuen Klimaschutzgesetz (2021) legte die Bundesregierung fest, dass Deutschland bis 2045 klimaneutral sein soll. Ziel ist es, bis zum Jahr 2030 die Emissionen von Treibhausgasen um mindestens 65 % gegenüber dem Stand von 1990 zu senken und bis zum Jahr 2045 Treibhausgasneutralität zu erreichen. Die Minderungslücke im Gebäudesektor beträgt für 2030 ca. 12 Mio. t CO₂-Äquivalente. Damit stehen mindestens 80 - 100 Mio. t CO₂-Minderung bis 2030 aus (MUK BW 2016, UBA 2008, 2018b+d, UBA 2019c). Die Landesregierung Baden-Württemberg strebt für die landeseigenen Gebäude verschärfte Klimaschutzziele an. Dabei verpflichteten sich auch die Hochschulen im Jahr 2021, die Klimaneutralität bis 2030 zu erreichen (BRD 2021a, siehe Kap.3.2).

Eine Kompensation der CO₂-Emissionen durch den Erwerb von Zertifikaten soll weitestgehend vermeiden werden. Dies hat zur Folge, dass die CO₂-Emissionen nur durch direkte Reduzierung und Kompensation anzustreben sind (MF BW 2020b). Dabei steht die Verbrauchsreduzierung an erster Stelle der Prioritätenliste sowie der Ausbau der erneuerbaren Energien.

Wie CO₂-Neutralität oder Emissionsfreiheit erreicht werden kann, wird in unterschiedlichen Szenarien dargestellt. Dabei ergeben sich verschiedene Fragestellungen und Herangehensweisen, die hier explizit nur an Einzelkriterien abgeleitet werden (z.B. Budget, Verbrauch, CO₂-Emission oder Zeitraum), um die Möglichkeiten und Spielräume vereinfacht darzustellen, die für die Erreichung der Klimaschutzziele 2030 bestehen.

Nimmt man die hier berechneten CO₂-Emissionen als Ausgangswert an, können stufenweise reduziert werden. Die aufgeführten Energieverbräuche und CO₂-Emissionen sind in Tab. 32 aufgeführt. Zusammen ergeben sich **17,71 Mt CO₂-Emissionen** für die Universität und das Universitätsklinikum Tübingen.

Tab. 32: Aufstellung der CO₂-Werte nach Energieverbrauch (eigene Darstellung)

	kWh/a	CO ₂ -Emission (kg CO ₂)	Fernwärme (0,091 kg/kWh)	Fossil (0,222-0,29 kg/kWh)
Stromverbrauch	96.908.823,94	3.876.352,96		
Wärmeverbrauch	138.554.492,69	13.835.213,93	11.764.735,16	2.070.478,77
Gesamtwerte	235.463.316,63	17.711.566,89	11.764.735,16	2.070.478,77

7.5.1. Szenario CO₂-neutral → CO₂-frei → Klimaneutral

Abgeleitet von den begrifflichen Definitionen **CO₂-neutral**, **CO₂-frei** und **klimaneutral** ergeben sich unterschiedliche Reduzierungsziele für das Untersuchungsgebiet. Geht man davon aus, dass die Erreichung der Klimaneutralität in drei Phasen stattfindet, würde zunächst die CO₂-Neutralität angestrebt werden, dann CO₂-Freiheit erzielt werden und in der letzten Instanz die Klimaneutralität erreicht werden. In diesem Szenario ergeben sich folgende Reduzierungswerte:

1. CO₂-neutral: Fossil-freie Energieversorgung

Geht man davon aus, dass sich die CO₂-Reduzierung auf den **Ersatz des Anteils fossiler Brennstoffe** beschränkt, dann würde die Energieversorgung aus erneuerbaren Energien bestehen:

- Erdgas in kWh 9,13 GWh/a (2,02 Mt CO₂)
- Heizöl in kWh 0,14 GWh/a (41,9 t CO₂)

→ Es sind **2,07 Mt CO₂-Emissionen zu ersetzen.**

2. CO₂-frei: 50 % - CO₂-Emissionen einsparen

Würde die Energieversorgung auf die Eigenproduktion von erneuerbaren Energien wie PV-Strom und Erdwärme umgestellt werden, werden noch **3,1 t CO₂** Emissionen verursacht. Diese Emissionen wären durch eine Verbrauchsreduzierung einzusparen. Die **Reduzierung des Verbrauchs von 5-10 %** wird hier angenommen, um weitere CO₂-Emissionen einzusparen:

- 5 % Reduzierung des Stromverbrauchs würden 4,8 GWh ausmachen, die mindestens 193.817,65 kg CO₂-Emissionen beim Stromverbrauch einsparen.
- 5 % Reduzierung des Wärmeverbrauchs würden 6.9 GWh ausmachen, die mindestens 691.760,7 kg CO₂-Emissionen einsparen.

→ Es bleiben **Restemissionen vorhanden, die durch eine weitere Verbrauchsreduzierung oder durch die Kompensation der Restemissionen auszugleichen sind (Ökostrom: 3,8 Mt CO₂, Fernwärme: 11.764 Mt CO₂.**

3. Klimaneutral: keine Treibhausgase oder Netto-Null -Emissionen

Strebt man Klimaneutralität an, dürfen keine Restemissionen verursacht werden. Die Universität Tübingen und das Universitätsklinikum würden nach den Berechnungen in dieser Arbeit keine CO₂-Emissionen mehr verursachen, wenn der aktuelle CO₂-Ausstoß von **17,71 Mt CO₂** aus Strom und Wärme komplett vermieden würde.

Das Ergebnis dieser Arbeit lässt zur Annahme verleiten, dass die Energieversorgung der Universität Tübingen mit relativ geringem Aufwand zunächst **CO₂-neutral** werden kann, da auch die Nutzung des ermittelten erneuerbaren Energiepotenzials noch CO₂-Emissionen verursacht. Eine Versorgung aus 100 % erneuerbaren Energien wird ebenso CO₂-Emissionen verursachen, da die CO₂-Äquivalente nicht bei **NULL** liegen. Somit kann eine weitestgehende CO₂-Reduzierung erreicht werden, wenn der Ersatz der fossilen Brennstoffe und der Ausbau von erneuerbaren Energien angestrebt wird. Eine Verbrauchsreduzierung müsste geschätzt 20-50 % erreichen.

7.5.2. Szenario CO₂-Reduzierung in Stufen 2030-2040-2050

In einem vereinfachten Stufenplan werden die CO₂-Emissionen schrittweise reduziert. Der Stufenplan führt theoretisch zu einer klimaneutralen Energieversorgung bis jeweils 2030-2040 oder 2050. Bei dieser stufenweisen Reduzierung der CO₂-Emissionen ergeben sich bei gleichbleibender Reduzierungsrate folgende Werte pro Jahr:

Für den Stromverbrauch ergibt sich jeweils bis:

- 2030 eine jährliche Reduktionsrate von **484.544,12 kg CO₂**.
- 2040 ergibt sich eine niedrigere Rate von **215.352,94 kg**.
- 2050 noch **138.441,18 kg CO₂** pro Jahr.

Für den Wärmeverbrauch ginge man davon aus, dass die CO₂-Emissionen der fossilen Brennstoffe in jedem Fall zu ersetzen sind. Pro Jahr ergibt sich bis:

- 2030 eine CO₂-Reduktionsrate von **258.809,85 kg CO₂**.
- 2040 dann **115.026,60 kg CO₂**.
- 2050 noch **73.945,67 kg CO₂** pro Jahr.

Die Höhe der erforderlichen CO₂-Reduzierung pro Jahr sind in Tab. 33 und in Abb. 108 dargestellt:

Tab. 33: Aufstellung der CO₂-Werte pro Jahrzehnt des Stufenplans bis 2050 (eigene Darstellung)

CO ₂ -Reduzierung in CO ₂ - kg pro Jahr bis:		2030	2040	2050
	Ausgangssituation	8 Jahre	18 Jahre	28 Jahre
Stromverbrauch	96.908.823,94	484.544,12	215.352,4	138.441,18
Wärmeverbrauch	138.554.492,69	258.809,85	115.026,60	73.945,67
Gesamtwerte	235.463.316,63	2.213.945,86	983.975,93	632.555,96

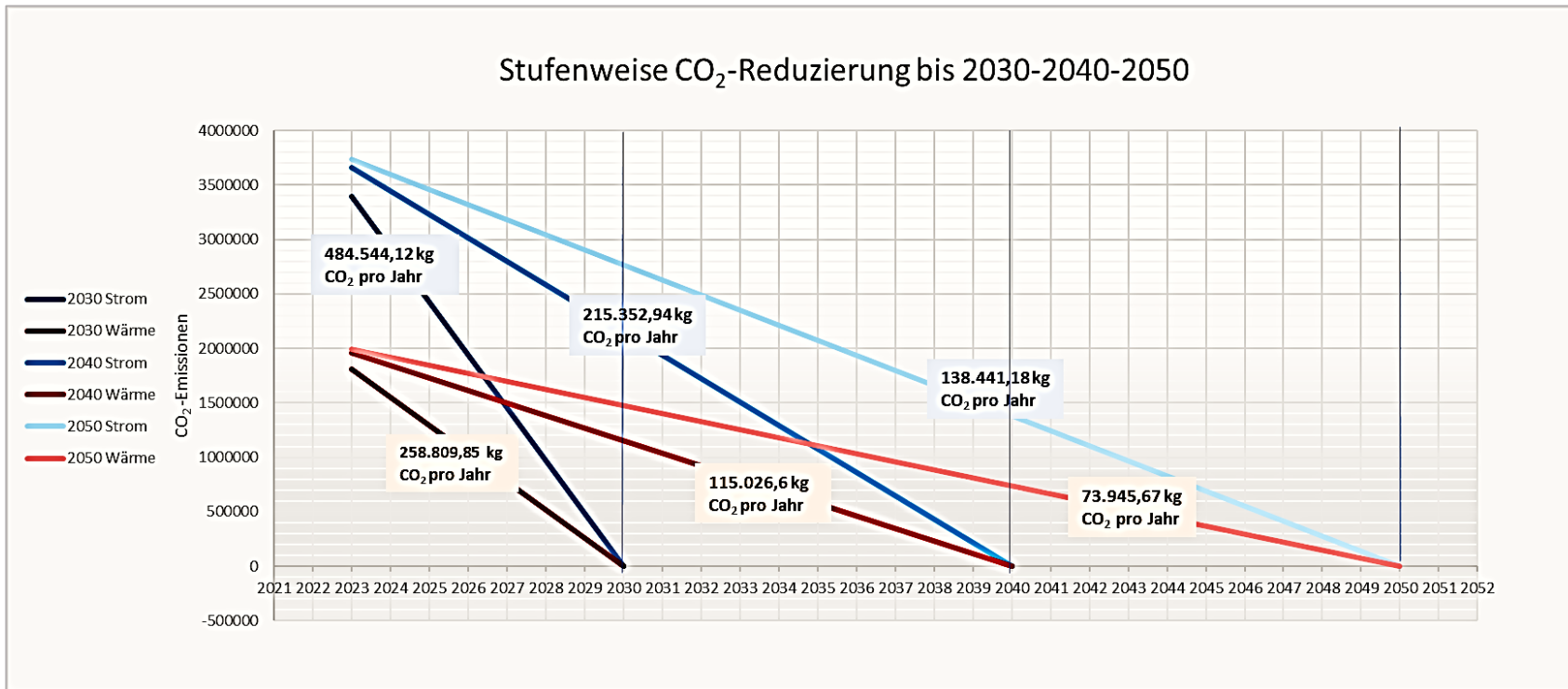


Abb. 108: Simulation zur stufenweisen CO₂-Reduzierung: 2030 – 2040 – 2050 (eigene Darstellung)

7.5.3. Szenario *Campus goes CO₂₀₃₀*

Die Aufstellung des Szenarios *Campus goes CO₂₀₃₀* geht von der definierten Ausgangssituation aus (siehe voriges Kapitel). Die zu kompensierenden Restemissionen ergeben sich aus den übrigen Energie- und CO₂-Werten von Universität und Klinikum gelaufen sich nach diesen Berechnungen auf:

- **3.876,3 Mt CO₂** aus 100 % Ökostrom (2015).
- **13.835,2 Mt CO₂** aus Wärmeenergie-mix (Fernwärme, Heizöl, Erdgas).
- **Gesamtemissionen: 17,71 Mt CO₂.**

Tab. 34: Aufstellung der CO₂-Emissionen nach Universität und Universitätsklinikum Tübingen (eigene Darstellung)

	Universität Tübingen	Universitäts- klinikum	Gesamtwerte in GW/a und t CO ₂
Stromverbrauch	42,31 GW/a	54,6 GW/a	96,91 GW/a
5 % Verbrauchsreduzierung	2,1 GW/a	2,73 GW/a	4,83 GW/a
38 % energetische Sanierungen	14,48 GW/a	18,67 GW/a	33,15 GW/a
Restverbrauch (theoretisch)	24,11 GW/a	31,77 GW/a	55,88 GW/a
Restemissionen (24,11 GW/a) x 0,040 CO₂-Äqu.)	964,4 t CO₂	1,27 Mt CO₂	2,23 Mt CO₂
	Universität Tübingen	Universitäts- klinikum	Gesamtwerte in GW/a und t CO ₂
Wärmeverbrauch	57,44 GW/a	81,11 GW/a	138,55 GW/a
5 % Verbrauchsreduzierung	2,87 GW/a	4,05 GW/a	6,93 GW/a
38 % energetische Sanierungen	21,83 GW/a	30,82 GW/a	52,65 GW/a
Restverbrauch (theoretisch)	32,74 GW/a	46,24 GW/a	78,98 GW/a
Restemissionen (24,11 GW/a) x 0,091 CO₂-Äqu.)	2,97 Mt CO₂	4,2 Mt CO₂	7,1 Mt CO₂

Das Gesamtergebnis der Energiepotenzialberechnungen in dieser Arbeit weist folgendes CO₂-Kompensationspotenzial aus:

- **5,4 Mt CO₂** aus Photovoltaik-Strom.
- **5,46 Mt CO₂** aus Erdwärme.
- **Gesamtkompensation: 10,86 Mt CO₂.**

➔ **Dies reicht nicht aus, um die gesamten Restemissionen aus dem Energieverbrauch mit dem hier berechneten erneuerbaren Energiepotenzial zu kompensieren.**

Der Verbrauch kann nicht auf null kWh reduziert werden. Es wird immer einen hohen Energieverbrauch geben. Dennoch kann ein Blick auf die erforderlichen Reduzierungsraten für Energie geworfen werden, wenn theoretisch Verbrauchswerte von Netto-Null angestrebt werden. Die Gebäude müssten baulich einen vergleichbaren Energiestandart wie Nullenergie- oder Passivhauses (nach GEG 2021) erreichen, bei denen der eigene Energiebedarf durch die eigene Energiegewinnung ausgeglichen ist. Die jährliche Reduzierungsrate oder die Menge an erforderlicher Eigengewinnung erneuerbarer Energien läge **bis 2030 bei 17,31 GWh** für Wärme und bei **12,11 GWh** für Strom. **Bis 2040 wären es pro Jahr 7,69 GWh** Wärme pro Jahr und **5,38 GWh** Strom pro Jahr, **bis 2050 bei 4,94 GWh** Wärme und **3,45 GWh** Strom pro Jahr (Abb. 109).

➔ Daran kann sich die benötigte EE-Ausbaurrate orientieren.

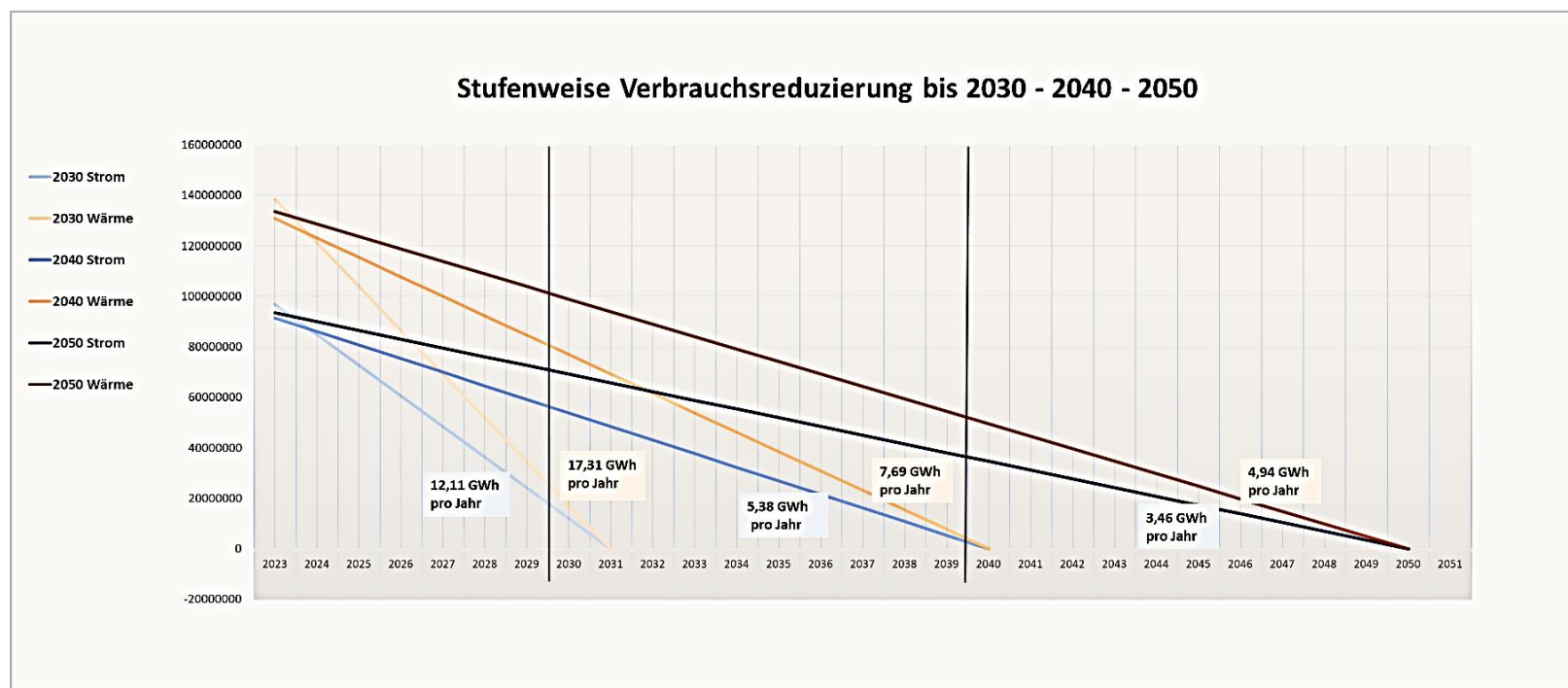


Abb. 109: Simulation zur stufenweisen Verbrauchsreduzierung 2030 – 2040 – 2050 (eigene Darstellung)

➔ **ABER:**

- Nach einer Reduzierung des Energieverbrauchs durch Suffizienz werden ca. 5-10 % eingespart.
- Eine technisch mögliche Reduzierung von ca. 38 % ist zusätzlich durch energetische Sanierung möglich. Das ergibt zu kompensierende Restemissionen von 2,48 t CO₂ (s. Tab 35).

➔ **2,48 Mt CO₂ sind durch das Photovoltaik-Potenzial kompensierbar!**

Dieselbe Simulation der Verbrauchsreduzierung des Wärmeverbrauchs ergibt Restemissionen von **7,1 Mt CO₂**, die durch das Wärmepotenzial von **5,46 Mt CO₂** hier nicht gedeckt werden können.

➔ **7,1 Mt CO₂ sind durch Erdwärmepotenzial nicht kompensierbar!**

Ginge dem Ausbau der erneuerbaren Energien eine signifikante Verbrauchsreduzierung durch den Gebäudenutzer voraus und würden ausreichend Investitionen in den Gebäudebestand geleistet werden, dann reicht das ermittelte erneuerbare Energiepotenzial *theoretisch* aus, um *rechnerische Klimaneutralität* im Untersuchungsgebiet zu erreichen.

Tab. 35: Szenario Campus goes CO₂₀₃₀

Universität Tübingen			
	Strom in GWh/a		Wärme in GWh/a
Gesamtverbrauch	42,31	Gesamtverbrauch	57,44
Verbrauchsreduzierung 10%	4,20	Verbrauchsreduzierung 10%	5,74
Reduzierter Verbrauch	38,11	Reduzierter Verbrauch	51,70
Energetische Sanierung 38 %	14,48	Energetische Sanierung 38 %	19,64
Neuer Gesamtverbrauch	23,63	Neuer Gesamtverbrauch	32,05
50 % PV-Potenzial	20,70	50% Erdwärmepotenzial	28,39
Kompensationsbedarf für 2,93 GWh Strom und 6,55 GWh Wärme pro Jahr	2,48		3,67
Universitätsklinikum Tübingen			
	Strom in GWh/a		Wärme in GWh/a
Gesamtverbrauch	54,60	Gesamtverbrauch	81,11
Verbrauchsreduzierung 10%	5,46	Verbrauchsreduzierung 10%	8,11
Reduzierter Verbrauch	49,14	Reduzierter Verbrauch	73,00
Energetische Sanierung 38 %	18,67	Energetische Sanierung 38 %	27,74
Neuer Gesamtverbrauch	30,47	Neuer Gesamtverbrauch	45,26
50 % PV-Potenzial	20,70	50% Erdwärmepotenzial	28,39
Kompensationsbedarf für 13,96 GWh Strom und 27,85 GWh Wärme pro Jahr	13,96		16,87

Es wurde eine Gewichtung durch die Bestimmung einer Reihenfolge von Maßnahmen zur Verbrauchsreduzierung festgelegt (Tab. 35):

- Indem die Verbrauchsreduzierung vor der Reduzierung durch energetische Sanierungen abgezogen wird, ergibt sich für den Gebäudenutzer ein weit höherer Aufwand für die Verbrauchsreduzierung. Während eine vorangegangene energetische Gebäudesanierung, den Aufwand für eine Verbrauchsreduzierung stark reduziert.

CO₂-Kompensation

Das Szenario **Campus goes CO₂₀₃₀** zeigt auf, welche CO₂-Kompensationen theoretisch noch erforderlich sind, wenn eine 10%ige Verbrauchsreduzierung erfolgt und eine energetische Sanierung insgesamt ca. 38 % Einsparung zusätzlich erwirken würde. Das vorhandene erneuerbare Energiepotenzial für PV-Strom und Erdwärme würde in dieser Arbeit auch dann den übrigen Verbrauch nicht vollständig decken.

Es wären jeweils CO₂-Kompensationen für Restemissionen zu leisten:

- ➔ **Die Universität Tübingen hat 2,93 GWh Strom und 6,55 GWh Wärme pro Jahr und das Universitätsklinikum Tübingen hat 13,96 GWh Strom und 27,85 GWh Wärme pro Jahr zu kompensieren.**
- ➔ **Durch die Erweiterung des Untersuchungsgebietes kann zusätzliches Potenzial für die Gewinnung von erneuerbaren Energien evaluiert werden, dass für die Kompensation der Restemissionen ausreichen könnte.**

7.5.4. Szenario Jährliches Budget - ein fester Finanzrahmen pro Jahr

Mit Blick auf die jährlich verfügbare Investitionssumme des Amtes für Vermögen und Bau Tübingen legt das *Szenario Jährliches Budget* einen festen Finanzrahmen von 4,5 Mio. Euro pro Jahr fest, der für Investitionen in erneuerbare Energien zur Verfügung steht. Für die Budgetverteilung werden 4,5 Mio. Euro pro Jahr als verfügbarer Finanzrahmen angenommen, von denen 2/3 für die energetische Gebäudesanierung verwendet werden. Weiter wird angenommen, dass 1/3 dieser Summe für Investitionen in erneuerbare Energieanlagen verwendet werden darf. Aufgrund dieser Annahmen ergibt sich ein jährliches Budget von insgesamt 1,5 Mio. Euro pro Jahr. Für den Zeitraum von 2022 bis 2050 wird das jährliche Budgets aufgeteilt (Tab. 36):

- ➔ **Das ergibt 900.000 Euro pro Jahr für Photovoltaikanlagen und 600.000 Euro für Erdwärmeeanlagen.**
- Das Jahresbudget von 1,5 Mio. Euro soll zu 60 % in Photovoltaikanlagen investiert werden und zu 40 % in Erdwärme, Wärme/Kältepumpen.
- UKT und UNI haben angenommen bis 2030 jeweils 6 Mio. Euro Investitionsbudget zur Verfügung, davon würden **3,6 Mio. Euro** für PV-Anlagen und **2,4 Mio. Euro** in geothermische Anlagen investiert werden.

Tab. 36: Jährliches Budget für UNI und UKT bis 2050 (eigene Darstellung)

Stufenplan	1/3 von 4,5 Mio. Euro	50% UKT/UNI in Mio. Euro	PV-Budget in Mio. Euro	Erdwärme-Budget in Mio. Euro
2030	12	6	3,6	2,4
2040	27	13,5	8,1	5,4
2050	42	21	12,6	8,4
Gesamtbudget	81	40,5	24,3	16,2

Für die stufenweise Investition werden die Berechnungen des erforderlichen Investitionsvolumens für PV- und Erdwärmeanlagen herangezogen. Die Top 20 -Standorte können als erste Umsetzungsmaßnahmen herangezogen werden. Diese Standorte sind nach dem Ranking die besten Standorte, deren Investitionsvolumen die Gesamtsumme des angenommenen Jahresbudgets ergeben. Der dafür erforderliche finanzielle Aufwand kann pro Standort in der Datenbank abgefragt werden.

➔ **DENN: 2,07 Mt CO₂ aus fossilen Brennstoffen sind vollständig kompensierbar!**

Es sind *keine „Klima-positiv-Effekte“* wie beispielsweise Maßnahmen zur CO₂-Bindung, Klimakühlung etc. in dieser Arbeit mitberücksichtigt. Mit Hilfe des Rankings von Strom- und Wärmeverbrauch wird eine Empfehlung abgegeben, die eine stufenweise Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien anstrebt. Zu prüfen ist eine Ausweitung der Untersuchungsflächen.

7.6. Ergebnisse zu weiterführenden Fragestellungen

Der erstellte Datensatz beinhaltet ein großes Potenzial für unterschiedliche Korrelationen. Die Möglichkeiten für detaillierte Standortanalysen sind in dieser Arbeit noch nicht ausgeschöpft und können in verschiedene Richtungen erweitert und an aktuelle Parameter angepasst werden. Um aktuelle Fragestellungen aufzugreifen, werden wissenschaftliche Ansätze vorgestellt, die in darauf aufbauenden Arbeiten weiterzuführen sind.

7.6.1. Versteckte Kosten der CO₂-Besteuerung

Seit dem 1. Januar 2021 ist eine CO₂-Steuer für alle Verbraucher eingeführt. Besonders betroffen sind Verbraucher von fossilen Brennstoffen, da ein signifikanter Energiepreisanstieg erwartet wird sowie die Anhebung der CO₂-Äquivalente. Die abzuführende CO₂-Steuer wird hier mit unterschiedlichen CO₂-Steuersätzen kalkuliert. Anhand der ausgewiesenen Summen wird die zukünftige Höhe der im Energiepreis enthaltenen CO₂-Steuer sichtbar. Anhand der verursachten CO₂-Emissionen von 2015 sind diese Zusatzkosten beispielhaft mit den CO₂-Steuersätzen von 25 €, 40 €, 50 €, 75 €, 100 € und 200 € pro Tonne berechnet und separat ausgewiesen. Die theoretisch mögliche Steuerhöhe erreicht je nach Steuersatz folgende Summen in Euro (s. Abb. 110). Diese Steuern werden über die Energielieferanten bereits abgegeben und sind in den steigenden Energiepreisen enthalten.

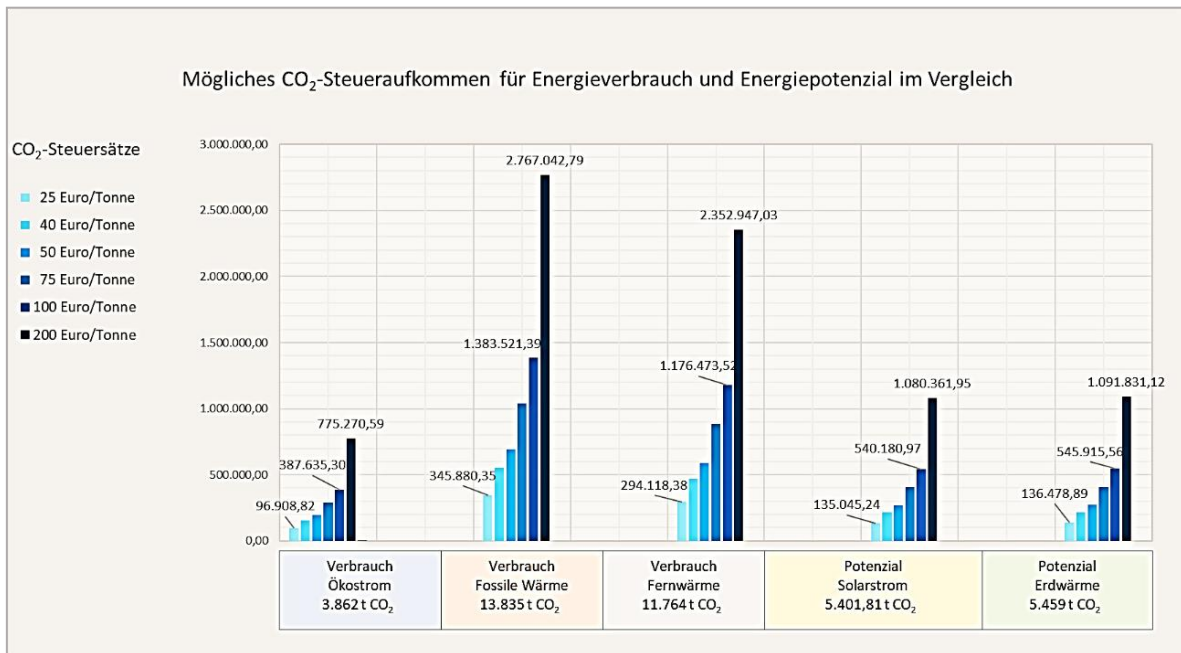


Abb. 110: Mögliches CO₂-Steueraufkommen für Energieverbrauch und Energiepotenzial im Vergleich (eigene Darstellung)

Besonders anschaulich zeigt Abbildung 111, wie sich die CO₂-Steuern bei gleichem angenommenen Energieverbrauchswert von 1 GWh/a als Strom- und Wärmeenergieverbrauch verhalten werden:

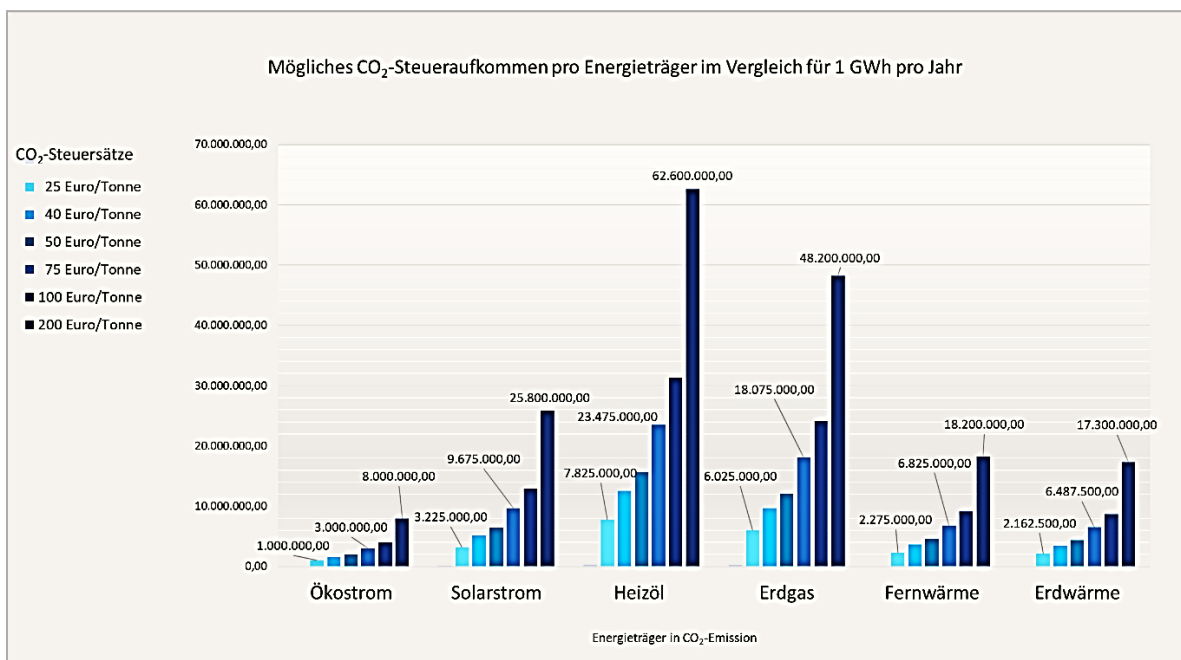


Abb. 111: Mögliches CO₂-Steueraufkommen pro Energieträger im Vergleich für 1 GWh pro Jahr (eigene Darstellung)

Erwartungsgemäß fällt die CO₂-Steuer von fossilen Brennstoffen höher aus als von Fernwärme und den erneuerbaren Energien. In der Zukunft verursachen die CO₂-Steuern weitere Kosten, die vermieden werden können, wenn direkt in erneuerbare Energieanlagen investiert wird. Sollte importierter Ökostrom ebenfalls

besteuert werden, steigen die Kosten für Ökostrom des Landes Baden-Württemberg ebenfalls. In der zukünftigen Strompreisentwicklung sind diese möglichen CO₂-Steuern dann enthalten:

Tab. 37: Aufstellung der CO₂-Steuersätze für Wärme (eigene Darstellung)

	Wärmeverbrauch Gesamt (Euro)	Wärmeverbrauch Als Fernwärme (Euro)	Wärmepotenzial von Erdwärme (Euro)
Verbrauchswerte in kWh/a	138.565.019,69	129.282.804,00	63.111.625,19
CO ₂ -Emission (CO ₂ t)	13.835,21	11.764,74	5.459,00
CO ₂ -Preis 25 E/t	345.880,35	294.118,38	136.478,89
CO ₂ -Preis 40 E/t	553.408,56	470.589,41	218.366,22
CO ₂ -Preis 50 E/t	691.760,70	588.236,76	272.957,78
CO ₂ -Preis 75 E/t	1.037.641,04	882.355,14	409.436,67
CO ₂ -Preis 100 E/t	1.383.521,39	1.176.473,52	545.915,56
CO ₂ -Preis 200 E/t	2.767.042,79	2.352.947,03	1.091.831,12

Aus den berechneten CO₂-Steuersätzen wird sichtbar, dass ein CO₂-Reduktionspotenzial stark von den Entwicklungen der CO₂-Äquivalente abhängig ist, die für die Energieträger festgelegt werden.

Tab. 38: Aufstellung der CO₂-Steuersätze für Strom (eigene Darstellung)

Stromverbrauch in kWh/a		Strompotenzial in kWh/a
Verbrauchswerte in kWh/a	96.908.823,94	41.874.494,09
Ökostrom (CO ₂ t)	3.862,07	5.401,81
CO ₂ -Preis 25 E/t	96.908,82	135.045,24
CO ₂ -Preis 40 E/t	155.054,12	216.072,39
CO ₂ -Preis 50 E/t	193.817,65	270.090,49
CO ₂ -Preis 75 E/t	290.726,47	405.135,73
CO ₂ -Preis 100 E/t	387.635,30	540.180,97
CO ₂ -Preis 200 E/t	775.270,59	1.080.361,95

Mit aktuellen Entwicklungen im Zusammenhang mit Diskussionen um Gasimporte aus Russland und North Stream I+II wird der Ausbau von erneuerbaren Energien zusätzlich gefördert um Erdgasabhängigkeiten weiter zu reduzieren und die Energiewende weiter voranzutreiben. In diesem Fall entstehen zusätzliche Kosten durch die Erhöhung der CO₂-Steuer. Aufzubringende Investitionssummen für erneuerbare Energien können sich an dem CO₂-Steueraufkommen orientieren. Hier wird das Investitionsvolumen das CO₂-Steueraufkommen gegenübergestellt. Dies kann sich auch auf die Bewertung und die Finanzierung von Solar- und Erdwärmeanlagen positiv auswirken.

- **Abgeleitete Annahme:** die schrittweise Anhebung der CO₂-Steuer – die mit geringen CO₂-Steuersätzen eingeführt wird und schrittweise für alle Energieträger gilt - einschließlich importiertem Ökostrom - macht 2% an den jährlichen Stromkosten aus. Mit steigenden CO₂-Steuersätzen ab 75 €/t und ab 100 €/t nehmen die CO₂-Steuern bereits 2-5% ein. Die jährlichen CO₂-Steuersummen werden dann bereits zwischen 169.000-338.000 Euro liegen.

7.6.2. Szenario „Solarstrom Universität Tübingen“

Wird die Universität Tübingen das Solarpotenzial nutzen, dann werden die anfallenden CO₂-Steuern zwischen 0,01-2,58 % der gesamten Anfangsinvestitionen einnehmen und zwischen 0,58-0,97% (>100€/t) liegen. Bei den jährlichen Betriebskosten nehmen sie zwischen 0,51- 38% ein und ab 100€/t bereits 50-101 %. Das Strompotenzial auf der nutzbaren Fläche von **41,8 GWh/a** entspricht einem CO₂-Emissionswert von **5.401 t CO₂** bei Eigennutzung aus monokristalliner PV-Anlage (CO₂-Äqui:0,129 kg/kWh). Aufgrund unterschiedlicher Herstellungsprozesse weisen die CO₂-Äquivalente der Solarmodule Werte zwischen 0,062 kg/kWh CO₂ (multikristallin), 0,083 kg/kWh CO₂ (amorph) bis 0,129 kg/kWh CO₂ (monokristallin) auf. Wegen der hohen Effizienz sind monokristalline PV-Module Standard. Nach momentaner Einschätzung steht eine Kostenersparnis bei einer CO₂-Bepreisung bei Strom nur dann in Aussicht, wenn das CO₂-Äquivalent für Solarstrom gesenkt wird oder die CO₂-Äquivalente für importierten Ökostrom angehoben werden. Andernfalls werden Kosten für Ökostrom weiterhin bei CO₂-Steuer kostengünstiger ausfallen als die Eigenproduktion von PV-/ Solarstrom.

Tab. 39: Prozentualer Anteil der möglichen CO₂-Steuerhöhe an den jährlichen Stromkosten: Vergleich der von Ökostrom und Solarstrom für die Universität Tübingen und Universitätsklinikum (eigene Darstellung)

Stromverbrauch Gesamt Ökostrom	CO ₂ -Preis in Euro/t	CO ₂ -Steuern in Euro	% Anteil an Stromkosten	
Strom UKT/UNI 96,18 GWh/a		14.076.489,23 Euro	100 %	
CO₂ in t/a 3.862,07 t	25 E/t	96.908,82	0,7 %	
	40 E/t	155.054,12	1,1 %	
	50 E/t	193.817,65	1,4 %	
	75 E/t	290.726,47	2,1 %	
	100 E/t	387.635,30	2,8 %	
	200 E/t	775.270,59	5,5 %	
Universität Tübingen Ökostrom	CO₂-Preis in Euro/t	CO₂-Steuern in Euro	% Anteil an Stromkosten	
Strom UNI 42,30 GWh/a		6.542.995,18 Euro	100 %	
CO₂ in t/a 1.692,32 t	25 E/t	42.308,17	0,65	
	40 E/t	67.693,07	1,03	
	50 E/t	84.616,34	1,29	
	75 E/t	126.924,51	1,94	
	100 E/t	169.232,68	2,59	
	200 E/t	338.465,36	5,17	
Szenario „Solarstrom Universität Tübingen“	CO₂-Preis in Euro/t	CO₂-Steuern in Euro	% Anteil an Anfangsinvestition + jährl. Betriebskosten (100 %)	
Strompotenzial UNI 17,49 GWh/a			AI: 17.774.596,50 Euro	BK: 444.364,91 Euro
CO₂ in t/a 2.256 t	25 E/t	135.045,24	0,01 %	0,51 %
	40 E/t	216.072,39	0,32 %	12,69 %
	50 E/t	270.090,49	0,52 %	20,31 %
	75 E/t	405.135,73	0,97 %	38,08 %
	100 E/t	540.180,97	1,29 %	50,78 %
	200 E/t	1.080.361,95	2,58 %	101,55 %

7.6.3. Szenario „Erdwärme Universität Tübingen“

Wird die Universität Tübingen die Nutzung von Erdwärme umsetzen, dann werden die anfallenden CO₂-Steuern zwischen 0,23-0,70 % der gesamten Anfangsinvestitionen einnehmen und zwischen 0,94-1,88% (>100€/t) liegen. Bei den jährlichen Betriebskosten nähmen sie zwischen 3- 9% ein und ab 100€/t bereits 12-24 %.

Der Wärmeverbrauch von **138,56 GWh/a** entspricht einem CO₂-Emissionswert von **13.835 t CO₂** aus den Energieträgern Fernwärme (0,295 kg/kWh), Erdgas (0,241 kg/kWh) und Heizöl (0,313 kg/kWh). Vor dem Hintergrund steigender Preise für Wärmeenergie spielen alternative Heizmöglichkeiten eine besonders große Rolle. Nach momentaner Einschätzung zeigt sich bei fossilen Energieträgern ein deutliches CO₂-Einsparpotenzial. Der Einsatz oder die Gewinnung erneuerbarer Wärmeenergien würde neben der Heizkostensenkung auch eine beträchtliche Senkung der CO₂-Emissionen bedeuten, da die CO₂-Äquivalente für Heizöl, Erdgas und Kohle stetig nach oben korrigiert werden.

Für den Wärmebedarf, der noch durch Erdgas und Heizöl gedeckt wird, ergeben die 2.070 t CO₂ in den einzelnen CO₂-Steuersätzen zwischen 31-248 % der verursachten Wärmekosten aus fossilen Energieträgern. Die Summen zwischen 152.373-1,2 Mio. Euro pro Jahr kosten würden. Dies gibt einen großen Anreiz diese Summen jährlich in die eigene Wärmegewinnung zu investieren. Da das Potenzial für Erdwärme im Untersuchungsgebiet aus baulichen und finanziellen Gründen in einem weit geringeren Umfang umgesetzt werden kann als das der Solarenergie, stehen die aufgeführten Ergebnisse für einen Richtwert.

- **Annahme:** die schrittweise Anhebung der CO₂-Steuer – auch für lokale Fernwärme - macht prozentual 5% an den jährlichen Wärmekosten aus. Mit steigenden CO₂-Steuersätzen ab 75 €/t und ab 100 €/t nehmen die CO₂-Steuern bereits 8-23 % ein. Die jährlichen CO₂-Steuersummen werden dann bereits zwischen 345.880-2,7 Mio. Euro liegen.

Der Anreiz für Investitionen in erneuerbare Energien ist hier am Stärksten gegeben, um den Energiebezug von Energielieferanten und Energiepreisentwicklungen zunehmend unabhängig zu werden.

Tab. 40: Prozentualer Anteil der möglichen CO₂-Steuerhöhe an den jährlichen Wärmekosten: Vergleich von Fernwärme und Erdwärme für die Universität Tübingen und Universitätsklinikum (eigene Darstellung)

Wärmeverbrauch Gesamt Fernwärme	CO ₂ -Preis in Euro/t	CO ₂ -Steuern in Euro	% Anteil an Wärmekosten
Wärme UKT/UNI 138,56 GWh/a		11.995.081,34 Euro	100 %
CO₂ in t/a 11.764,74 t	25 E/t	345.880,35	2,88 %
	40 E/t	553.408,56	4,61 %
	50 E/t	691.760,70	5,77 %
	75 E/t	1.037.641,04	8,65 %
	100 E/t	1.383.521,39	11,53 %
	200 E/t	2.767.042,79	23,07 %
Universität Tübingen Heizöl + Erdgas	CO₂-Preis in Euro/t	CO₂-Steuern in Euro	% Anteil an Wärmekosten
Fossil Strom UNI 6,09 GWh/a		491.258,12 Euro	100 %
CO₂ in t/a 2.070,47 t	25 E/t	152.373,37	31,02 %
	40 E/t	243.797,39	49,63 %

	50 E/t	304.746,73	62,03 %	
	75 E/t	457.120,10	93,05 %	
	100 E/t	609.493,47	124,07 %	
	200 E/t	1.218.986,94	248,14 %	
Szenario „Erdwärme Universität Tübingen“	CO₂-Preis in Euro/t	CO₂-Steuern in Euro	% Anteil an Anfangsinvestition + jährl. Betriebskosten (100 %)	
Wärmepotenzial UNI 23,68 GWh/a			AI: 24.225.113,59 Euro	BK: 1.894.401,8 Euro
CO₂ in t/a 2.276 t	25 E/t	56.901,97	0,23 %	3,00 %
	40 E/t	91.043,15	0,38 %	4,81 %
	50 E/t	113.803,94	0,47 %	6,01 %
	75 E/t	170.705,91	0,70 %	9,01 %
	100 E/t	227.607,89	0,94 %	12,01 %
	200 E/t	455.215,77	1,88 %	24,03 %

7.6.4. Kostenszenarien für die Universität Tübingen

In vier vereinfachten Szenarien wird für die Universität Tübingen zusammengestellt, welche wesentlichen Kosten anfallen, wenn das erneuerbare Energiepotenzial teilweise oder vollständig gewonnen und selbst genutzt oder eingespeist wird. Dabei werden die berechneten Kosten für den Anlagenaufbau, das Betreiben, die verdeckten CO₂-Steuern sowie Einspeisevergütung und EEG-Umlage aufgestellt. Weitere Simulationen und Kombinationen sind weiterführenden Arbeiten vorbehalten. Im Folgenden wird die Universität Tübingen eingehender dargestellt. Folgende Szenarien stellen extreme Beispiel dar, um die Gegensätze hervorzuheben. Der Stufenplan kann folgendes aufzeigen (s. Tab. 44):

Szenario 1: Wie bisher

Die Fernwärme und der Ökostrom bleiben bei den bisherigen Verbrauchs- und Kostenwerten. Keine zusätzliche Investition in erneuerbare Energien.

Szenario 2: 100% Eigennutzung

Das Energiepotenzial (PV-Strom und Erdwärme) wird in vollem Umfang für die Energiegewinnung **produziert und selbst genutzt** und verursacht nach geltender Gesetzeslage eine EEG-Umlage. Da insgesamt keine Deckung besteht, entstehen noch Energiekosten zu 57 % Strom und zu 49 % Wärme.

Szenario 3: 100% Eigenproduktion

Das Energiepotenzial wird **selbst produziert** und **vollständig** in das lokale Netz **eingespeist**. Es wird eine EEG-Einspeisevergütung verdient.

Szenario 4: 100% bedarfsdeckende Eigenproduktion

Das erfordert die Installation einer doppelten Menge an Anlagen, die doppelte Gesamtkosten bei den Investitionen und weiteren Kosten verursachen, als in den Potenzialanalysen ermittelt wurde. Für CO₂-Steuern sind noch 59 % Strom und 49% Wärme dazu zurechnen.

Es ist in **Szenario 1** zu erkennen, dass die Gesamtkosten und eine mögliche CO₂-Steuer noch am geringsten ausfallen. Zu den Energiepreisen kommen hier ausschließlich die CO₂-Steuern hinzu. Nicht einkalkuliert sind steigende Energiepreise (insbesondere für fossile Energieträger, die bei der Versorgung der Universität

Tübingen noch eine geringe Menge darstellen, jedoch bei Preissteigerung bis zu 1.000 % und Besteuerung stärker ins Gewicht fallen können. Auch mit Auflagen für Energieimporte wie Ökostrom aus Norwegen ist in Zukunft zu rechnen. Das wäre bis 2030 zu erreichen. In der folgenden Tabelle sind die Kostenszenarien einander gegenübergestellt:

Tab. 41: Vereinfachte Darstellung der Kosten in den Szenarien 1,2,3 und 4 (eigene Darstellung)

Universität Tübingen	Szenario 1: Wie bisher	Szenario 2: 100% Eigennutzung	Szenario 3: 100% Eigenproduktion	Szenario 4: 100% Bedarfsdeckende Eigenproduktion
Kostenfaktoren	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Stromkosten	6.542.995,18	3.860.367,15 (49%)	6.542.995,18	-
Wärmekosten	5.380.066,57	3.066.637,94 (57%)	5.380.066,57	-
Gesamte Energiekosten	11.923.061,75	6.927.005,09	11.923.061,75	0,00
Investitionen+Kosten				
Strom	?	18.462.798,66	18.462.798,66	36.925.597,32 (200%)
Erdwärme	?	36.968.683,44	36.968.683,44	73.937.366,88 (200%)
Gesamtkosten 1.Jahr		55.431.482,1	55.431.482,1	110.862.964,20
EEG-Umlage	-	+ 651.171,57	-	566.519,26 (43%) 3.138.886,50 (für 96,9 GWh)
EEG-Einspeise- vergütung	-	-	- 1.006.165,99	-
EEG-Kosten und Einnahmen		+ 651.171,57	- 1.006.165,99	
CO ₂ -Bepreisung nach Energieträgern				
Ökostrom	155.054,12 (100%ÖKO)	88.380,85 (Öko57%)	155.054,12 (100%ÖKO)	432.144,78 (100%PV)
PV-Strom		216.072,39 (100% PV-Pot, 43% Deck)		
Fernwärme/Fossil	553.408,56 (Fernwärme/ Fossil)	173.004,21 (49%Fernw)	553.408,56 (Fernwärme/ Fossil)	534.496,44 (100%Erd)
Erdwärme		218.366,22 (100% Erdw,51% Deck)		
Gesamte CO ₂ -Steuer (40€/t CO ₂)	708.462,68	695.823,67	708.462,68	966.641,22
Gesamtkosten pro Jahr	12.937.149,61	63.223.618,53	66.654.003,04	108.690.718,92
ohne EEG-Umlage		63.054.310,86		105.551.832,42
auf 20 Jahre (Basiswert)	252,6 Mio. €	1, 261 Mrd. €	1.341 Mrd. €	2.111 Mrd. €

In **Szenario 2** halbieren sich die Energiekosten, da das erneuerbare Energiepotenzial ausgebaut und genutzt wird. Es wird hier davon ausgegangen, dass in einem Jahr die erforderlichen Investitionskosten auf einmal anfallen, zusätzlich fällt die volle EEG-Umlage und unterschiedliche CO₂-Steuersummen an, die sich durch den Energiemix neu zusammensetzen. Dabei ist außer Acht gelassen, dass Investitionen eher schrittweise statt zu 100% in einem Jahr getätigt werden. Die CO₂-Steuern verringern sich bereits durch den Ersatz der fossilen Brennstoffe.

In **Szenario 3** bleiben die Energiekosten wie bisher erhalten, weshalb auch die CO₂-Steuern gleichbleiben. Es kommen die Investitionskosten hinzu und eine EEG-Einspeisevergütung wird für die gesamte Energiemenge eingenommen. Da die produzierte Energie nicht selbst genutzt wird, fällt nach noch geltender Gesetzeslage keine EEG-Umlage an. Hierbei wird nicht berücksichtigt, dass der Energieverbrauch und die Energiekosten zusätzlich steigen können.

In **Szenario 4** ersetzen die Investitionskosten nun die gesamten Energiekosten, wodurch eine Unabhängigkeit von den Energiepreisen entsteht. Dafür sind 2-fache Investitionskosten erforderlich, um 100 % Deckungsgrad zu erreichen, was bisher nicht aus den Potenzialanalysen hervorgeht. Die CO₂-Steuern sind aufgrund des PV-CO₂-Äquivalents weit höher als für Ökostrom. Nicht berücksichtigt sind eine mögliche Erhöhung des PV- CO₂-Äquivalents für importierten Strom und das Wegfallen der EEG-Umlage, sowie steigende Energiepreise. In wieweit der CO₂-Schattenpreis von den Investitionskosten abgezogen werden kann, bleibt genaueren Bestimmungen und weiterführenden Arbeiten überlassen.

8. Zusammenfassung

Die Projektergebnisse zeigten, dass die Potenzialanalysen durch hochauflösende Geodaten weit genauere Berechnungen und damit weiterführende Forschungsprojekte ermöglichen. Aufbauend auf den Potenzialanalysen (Manton et al. 2012, Manton et al. 2016) sind in dieser Dissertation zusätzliche Methoden zur Flächenbewertung erarbeitet worden (Manton et al. 2018). Die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Datenformate wurde durch angepasste Umrechnungen möglich. Ein wesentliches Schlüsselergebnis dieser Arbeit stellt diese Flächenbewertung nach energetischem Jahresertrag, Kilowattpreis und CO₂-Wert dar. Mit der Berechnung technischer Kennzahlen und der Bestimmung gewichteter Indikatoren ist die Rangfolgenbildung innerhalb der Datenzeilen erfolgt und ermöglichte die Ableitung eines Umsetzungsvorschlages zum Ausbau erneuerbarer Energien an den Universitäts- und Klinikumsgebäuden in Tübingen.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass ein großes Potenzial an erneuerbaren Energien im Untersuchungsgebiet besteht, das auf verschiedene Weise nutzbar ist. Zwar ergibt die Auswertung der Untersuchungsflächen keine Deckung des gesamten Energiebedarfs an Strom und Wärme, jedoch kann theoretisch ein Anteil von fast 50 % gedeckt werden. Für einen höheren Deckungsgrad benötigt es die Erweiterung des Flächenpotenzials. Auch über eine Effizienzsteigerung der eingesetzten Technik kann das Potenzial und damit der Deckungsgrad insgesamt erhöht werden. Weiteres CO₂-Einsparpotenzial entsteht durch die Substitution fossiler Brennstoffe *und eine signifikante Senkung des Energieverbrauchs* insgesamt. Die Umstellung auf Energien mit geringen CO₂-Äquivalenten beeinflusst die CO₂-Bilanz positiv. Hier wurde berechnet, welche Energieträger in welchem Umfang in die CO₂-Bilanzierung einfließen könnten und was dabei zu beachten ist. Bevorstehende Preissteigerungen für Holzprodukte, fossile Brennstoffe wie Erdgas und Heizöl rechtfertigen höhere Investitionen in erneuerbare Energien sowie die Berücksichtigung zusätzlicher Kosten für CO₂-Steuern und weitere Umlagezahlungen. Die aktuelle globale Rohstoffknappheit mit Lieferengpässen verzögert den Ausbau dennoch, was in Zeitplänen ebenfalls zu berücksichtigen ist.

Unterschiedliche Szenarien beleuchten beispielhaft die Nutzung von Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien und machen Aussagen zum CO₂-Fussabdruck im Bereich der Energieversorgung und wie sich der Austausch von Energieträgern auf die CO₂-Bilanzierung auswirken kann. Von diesem Ist-Zustand von Universität und Klinikum wurde in den Szenarien ausgegangen, die auf unterschiedlichen Umsetzungsmöglichkeiten für das Erreichen der Klimaschutzziele 2030 setzen. Danach kann selektiv vorgegangen werden. Einzelne Maßnahmen können nach unterschiedlichen Kriterien in der Standortdatenbank ausgewählt werden und liefern Informationen zu Substitution der Energieträger, dem Investitionsvolumen und zur CO₂-Kompensationsberechnung (CO₂-Emission, -Reduktion, -Steuersätze und -Schattenpreis).

Im **Szenario Jährlicher Finanzrahmen** wird anhand eines jährlichen Budgets berechnet, welches Investitionsvolumen für erneuerbare Energien zur Verfügung steht und wie die Verteilung auf PV- und Erdwärmeanlagen vorgenommen werden kann. Daran ist zu erkennen, welche CO₂-Emissionen eingespart werden können. Dennoch bleibt ein großer Teil an CO₂-Emissionen zu kompensieren. Das **Szenario CO₂-neutral – CO₂-frei – klimaneutral** zeigt eine CO₂-Reduzierung in 3 Stufen auf. Hierin wird ein langsamerer

Weg (2030-2040-2050) beschritten, in dem zunächst die fossilen Brennstoffe durch erneuerbare Energien ersetzt werden, der Verbrauch reduziert und anschließend die Restemissionen kompensiert werden. Das **Szenario Campus goes CO₂₀₃₀** schlägt einen direkten Weg für die stufenweise CO₂-Reduzierung vor. Aus den Rangfolgen der besten Standorte **Tübingens next Top places** können Standorte gewählt werden, die eine vorselektierte Auswahl an Gebäuden für Umsetzungsmaßnahmen und Investitionen anbieten.

Mit Blick auf die Herausforderungen, die die Klimaschutzziele mit sich bringen, wurde eine anwenderfreundliche Klassifizierungsmethode erarbeitet, die auf Excel-Tabellen basiert. Die nachvollziehbaren Rechenwege sind in Tabellen dokumentiert und in separaten Beschreibungen im Anhang einsehbar. Die beabsichtigte Transparenz soll die Methode für Interessierte anwendbar, kopierbar und erweiterbar machen und mögliche Bewertungsmethoden aufzeigen. Für die Dokumentation von nachhaltigen und klimaschützenden Maßnahmen sind CO₂-Bestimmungen z.B. für die CO₂-Bilanzierung zu CO₂-Footprint und -Handprint nutzbar und für die Ableitung von CO₂-Kompensationsmaßnahmen relevant.

Die Ergebnisse alleine tragen noch nicht zum Klimaschutz bei. Sie bieten lediglich eine Entscheidungsgrundlage für klimaschützende Maßnahmen in Form von Investitionen in Photovoltaik und Erdwärme, die in Zukunft vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele 2030 getroffen werden können. Komplexen Abwägungs- und Entscheidungsprozessen kann durch die Forschung nur zu einem gewissen Maße zugearbeitet werden. Einer von vielen möglichen Wegen wurde hier aufgezeigt, ob und wie eine Umsetzung stattfindet, liegt bei den Entscheidungsträgern und hängt zum einen von ihrer Finanzierbarkeit und zum anderen von ihrem Erfolgsversprechen in der Energiegewinnung und der CO₂-Einsparung ab. Sie werden an ihrer Effizienz in Bezug auf die Erreichung der beschlossenen Klimaschutzziele gemessen. Wie die Umstellung auf erneuerbaren Energien und die Eigenproduktion von Strom und Wärme in den kommenden Jahren bilanziert wird, ist eine wichtige Frage. Denn mit den geltenden CO₂-Äquivalenten für Wind- und Wasserkraft, fossile Brennstoffe und Atomstrom, können sich ganz neue Aspekte ergeben, die zu diskutieren sind.

Die Herausforderungen in naher Zukunft werden weiterhin die Auswirkungen der Corona-Pandemie und des Krieges in der Ukraine sein, die große wirtschaftliche Veränderungen mit sich bringen und die Energieversorgung besonders beeinflussen. Zwar wird der Ausbau der erneuerbaren Energien besonders gefördert, ebenso wird weiterhin auf konventionelle Energieträger wie Kohle und Atomkraft zurückgegriffen, wenn es zu Energieengpässen kommt. Es wird davon ausgegangen, dass die Diskussion über zusätzliche CO₂-Kosten in Form einer Steuer nach der Überwindung der aktuellen politischen Herausforderungen intensiv weitergeführt wird. Die verschiedenen Ansätze im Umgang mit CO₂-Versteuerungsmodellen und dem zu investierenden Kapital in erneuerbare Energien wurde in dieser Arbeit aufgenommen. Die Berechnung des CO₂-Reduktionspotenzials wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen – explizit die Versteuerung nicht eingehaltener Klimaschutzziele.

Die neue Datenbank dieser Arbeit ermöglicht es, weitere innovative Forschungsansätze darauf aufzubauen und das Untersuchungsgebiet auf umliegende Flächen auszuweiten. In weiterführenden Projekten können Nutzungskombinationen wie z.B. Photovoltaik-Freiflächen auf Agrar- und Grünflächen oder großflächige Erdwärmesondenfelder auf geeigneten Flächen im Außenbereich weiterverfolgt werden. Über die ausgewählten Ergebnisse hinaus, sind weitere Korrelationen und Ableitungen möglich. Die GIS-Datenbank hält detaillierte Standortansichten für die Weiterverwendung durch Entscheidungsträger bereit und

ermöglicht die Abfrage und Kartendarstellung von gebäudespezifischen Informationen. Kartographisch relevante Planungsvorlagen von Dächern und den Gebäudegrundflächen sind für Förderanträge abrufbar, wie sie seit dem Erlass der Photovoltaik-Pflicht-Verordnung (PVPf-VO 2021) gefordert sind. In wieweit die Ergebnisse diesen Zielen zuarbeiten und nutzen können, wird anschließend diskutiert.

9. Diskussion

Die Umsetzung nachhaltiger Maßnahmen konzentriert sich auf alle Bereiche, in denen die Universität mit der lokalen, regionalen bis internationalen Umgebung interagiert und Einfluss auf sie nimmt. Übergeordnet orientieren sich bundesweite Vorgaben am Deutschen Nachhaltigkeitskodex (DNK), den globalen Nachhaltigkeitszielen (SDGs) und den handelsrechtlichen Corporate Social Responsibility-Vorschriften (CSR). Für das Monitoring nachhaltiger und klimaschützender Maßnahmen wird bewusst und unbewusst auf geographische Informationssysteme zurückgegriffen, um Aufgaben in der Raumbetrachtung zu organisieren. Diese Aspekte sind Schnittstellen übergreifend zu diskutieren:

- ➔ Aussagekraft der Ergebnisse
- ➔ Fragen zur Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen
- ➔ Verknüpfung von Geoinformatik und Nachhaltiger Entwicklung (NE)
- ➔ CO₂-Bilanzierung für Klimaschutzmaßnahmen

9.1. Die Aussagekraft der Ergebnisse

Der hohe Arbeitsaufwand für verbesserte Potenzialanalysen lieferte im vorangegangenen Projekt sehr genaue Basisdaten, die für weiterführende Untersuchungen geeignet sind. Es bleibt individuell abzuschätzen, ob ein Mehraufwand für den jeweiligen Zweck gerechtfertigt bleibt, da kleinere Untersuchungsgebiete und Gebäudebestände mit Durchschnittswerten ausreichen können. In dieser Arbeit bot es eine genaue Datenbasis für aufbauende technische Konfigurationen. Dieselbe Genauigkeit wurde in den weiterführenden Berechnungen angestrebt. In dieser Arbeit waren die arbeitsaufwendigen Methoden zielführend.

Inzwischen existiert das Solarkataster des LUWB Baden-Württemberg), dessen Werteausweisung über gebäudespezifische Genauigkeit verfügt und Potenzialwerte in Güte- und Eignungsklassen angibt. Inzwischen ist ein flächendeckendes geologisches Abfragetool verfügbar, das für Baden-Württemberg lückenlos abrufbar ist. Die Berechnung des oberflächennahen geothermischen Wärmepotenzials während des vorangegangenen Projekts übertraf die Aussagekraft des ISONG-Servers (2013), da dieser das Untersuchungsgebiet derzeit noch nicht abdeckte. Durch neue effiziente Produkte und innovative technische Entwicklungen werden andere Kombinationen möglich, als sie in dieser Arbeit berücksichtigt sind. In der Datenbank sind die Ergebnisse an neue Rahmenbedingungen anpassbar und bieten einen Spielraum für Modifizierungen an Parametern für Photovoltaik-Module und Erdwärmepumpen. Folglich werden sich hier Abweichungen zum berechneten theoretischen und realen Jahresertrag (kWh/a und Euro/a) ergeben.

Die CO₂-Werte weisen eine sehr geringe Fehlerquote bzw. Abweichung auf, da die Werte in Abhängigkeit des Energieertrags (kWh/a) bestimmt sind. Die Ableitung der Indikatoren basiert auf den technischen Kennzahlen Jahresertrag (kWh/a), Kilowattpreis (Euro/kWh) und CO₂-Bestimmungen (t CO₂/a) zur Standortbewertung. Es ermöglicht die Rangfolgenbildung mittels gewichteter Indikatoren, wobei die Priorisierung an den Klimaschutzziele 2030 als Thema dieser Arbeit orientiert ist.

Die Gesamtergebnisse zeigen die Ist-Situation des Untersuchungsgebiet, die für die Ableitung einer Strategie zur Erreichung der Klimaschutzziele essentiell ist. Darin ist zu erkennen, dass ein hohes Energiepotenzial besteht, das durch Flächenerweiterung und Effizienzsteigerung sogar noch steigerungsfähig ist und einen hohen Deckungsgrad besitzt. Die definierten Standorte sind nach besten Eigenschaften klassifiziert und bieten eine große Auswahl für die Energiegewinnung. Ob und in welcher Höhe die erforderlichen Maßnahmen umgesetzt werden, hängt von den Entscheidungsträgern ab. Dabei ergeben sich unterschiedliche Herausforderungen.

Bundesweit wird an der Vereinfachung von Genehmigungsverfahren für erneuerbaren Energien gearbeitet, die innovative Energielösungen erleichtern und großflächige Anlagen mit kombinierter Nutzungsfunktion realisieren lassen. Zeitgleich sind in Tübingen strengere Auflagen für Bohrungen in Grundwasserspeicher und Gipskeuperführende Gesteinsschichten festgelegt, die für die Installation von Erdwärmesonden von Probebohrungen, Thermal Response Test (TRT) und ein ausführliches geologisches Gutachten von Experten vorgeben. Auf den Höhenlagen von Tübingen sind beispielsweise geothermische Anlagen mit Photovoltaik auf Agrarflächen kombinierbar und in Fernheizkraftwerke einspeisbar.

9.2. Die Verknüpfung von Geoinformatik mit Nachhaltigkeit und Klimaschutz

Der globale Erfolg des Klimaschutzes hängt vom internationalen und interdisziplinären Datenaustausch ab. Das weltweite klimaschützende Engagement wird mittels geographischer Informationssysteme analysiert, dokumentiert und visualisiert. In Bereichen, in denen bisher wenig Daten erhoben wurden, kann die Angewandte Geographie und die Geoinformatik gemeinsam mit der Nachhaltigkeit und dem Klimaschutz spezifische Erhebungen durchführen.

Auf lokaler Ebene liegen die Vorteile geographischer Informationssysteme in der Verwaltung von unterschiedlichen Datenquellen. Relative Datenbanken, bestehend aus Tabellen mit Primärschlüsseln, können beispielsweise SQL-Datenbanken verknüpfen und Planungsvorlagen für Bauvorhaben und Förderanträge vorbereiten. Das kartographische Material ist für Standortanalysen geeignet und bietet sehr viele Erweiterungs- und Spezifizierungsmethoden an.

Es gibt Grenzen, wo bereits professionelle Software etabliert ist. Zum Beispiel bestehen bereits umfassende *Computer Aided Facility Management Systeme (CAFM)*, die Institutionen mit großem Gebäudebestand nutzen, um Flächenmanagement (Liegenschaften, Gebäude und Flurgrundstücke) zu betreiben und Prozesse zu steuern, die neben dem infrastrukturellen auch kaufmännisches Gebäude- und Energiemanagement verwalten. Der Einsatz eines CAFM-Systems ist zum einen mit der Planung der IT-

Infrastruktur und zum anderen mit Struktur- und Prozessveränderungen zu koordinieren. Verbesserungswürdige Verwaltungsstrukturen werden sichtbar, die in diesem Einführungsprozess mit verändert werden können und während Zertifizierungsverfahren optimierbar sind.

Die direkte Integration des Nachhaltigkeitsmanagements in ein CAFM-System gehört inzwischen zur guten Unternehmenskultur. Da CAFM-Systeme nicht aus einer einzig dafür erworbenen Software stammen, sind auch hier einzelne Elemente integrierbar. Ausreichende Möglichkeiten für eigene Softwarelandschaften und Schnittstellen zu kompatiblen Elementen des Qualitäts- und Nachhaltigkeitsmanagements können in funktionierende Verwaltungsbereiche integriert werden. Zertifizierungen können vorangetrieben werden, da einzelne Systeme bereits entsprechenden gesetzlichen Vorgaben entsprechen müssen und diese Aufgaben erfüllen (wie z.B. DIN-Norm 32736, GEFMA).

Universitäten werden zunehmend auf ihre *Managementstrukturen* überprüft und erfahren eine Evaluierung ihrer Prozesse und Leistungsfähigkeit. Auch überregional können sich Bildungseinrichtungen weiteren Zertifizierungen stellen, wie beispielsweise dem *International Sustainable Campus Network (ISCN)*, dass alle Bereiche von Universitäten und Hochschulen auf ihre umweltverträgliche Betriebswirtschaft, ihre Einhaltung der *Sustainable Development Goals (SDGs)* und ihre Leitbilder untersucht. Dem *International Sustainable Campus Network (ISCN)* gehören die Universität Dresden und die Hamburger Hochschule für angewandte Wissenschaften bereits an. Um dem Netzwerk beitreten zu können, sollte die Universität wesentliche Transformationen in Verwaltung und Forschung umgesetzt haben. Die bereits genannten Beispielprojekte sind Wege, die zu einer Transformation hinführen. Die Aufnahme in das internationale Netzwerk *International Sustainable Campus Network* könnte für Tübingen sehr förderlich sein.

9.3. CO₂-Bilanzierung für Klimaschutzmaßnahmen

Die CO₂-Bilanzierung ist im Untersuchungsgebiet nach den geltenden CO₂-Äquivalenten bereits optimiert. Die 100 %-Ökostrom Versorgung in den Landesbauten senkt die ausgewiesenen CO₂-Emissionen in der CO₂-Bilanzierung. Dafür wird Ökostrom importiert statt selbst produziert. Die Eigenproduktion von Strom aus erneuerbaren Energien anstelle des momentanen Imports von Ökostrom aus Europa wird mit Blick auf die bevorstehenden CO₂-Steuern in den Vordergrund rücken.

Gis-gestützte CO₂-Bewertungsmethoden können im Energie- und Gebäudemanagement integriert werden, um interaktive Abfragen und eine automatisierte Ausweisung von CO₂-Kompensationsmaßnahmen zu ermöglichen. Da genaue Messungen und Vergleiche zu Vorjahresbilanzen erforderlich werden, sind signifikante Einsparungserfolge in Zukunft nachzuweisen, um auf die Zielgerade 2030 zu gelangen. Ein mögliches geschicktes „Grenzwert-matching“ wäre zu vermeiden, um Transparenz zu signalisieren. Zunehmendes Interesse und aktives Engagement für Nachhaltigkeit und Klimaschutz sowie die Bereitschaft für neue Ideen und innovative Ansätze steigt mit sichtbaren Erfolgen.

- ✓ Jede Bildungseinrichtung besitzt unterschiedliche Rahmenbedingungen und muss individuelle Lösungen finden. Hier wird nochmals auf die Veröffentlichungen von HOCHN (2018) verwiesen.

9.4. Fragen zur Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen

Die Hoheit in Sanierungsfragen liegt beim *Staatlichen Hochbau*, der den Finanzierungsrahmen verwaltet. Zwar verfügen die Dezernate und Abteilungen in Universitäten und Hochschulen ebenfalls über Kompetenzen zur Planung von Gebäudesanierungen, technischen und baulichen Sanierungsmaßnahmen, sind aber nicht befugt eigenständig zu entscheiden. Die Aufgabenverteilung entlastet die Verwaltung der Bildungseinrichtungen ebenso wie sie deren Einflussnahme auf Priorisierung und Umsetzung schmälert. Die Anreize für energiesparendes Verhalten sind für den *Nutzer Universität* nur bedingt gegeben, da Einsparungen nicht direkt dem eigenen Finanzhaushalt gutgeschrieben werden, sondern dem Landeshaushalt insgesamt zugutekommen.

Die Leitung der Bildungseinrichtungen erhält wenig Anreize für Einsparungen, die in den Folgejahren zu Budgetkürzungen führen können. Aufgrund der Konkurrenzsituation zwischen staatlichen Bildungseinrichtungen sind sie verleitet, ihre Ausgaben nicht zu reduzieren. Dies widerspricht in vielerlei Hinsicht den nachhaltigen und energiesparenden Klimaschutzzielen 2030. Somit besteht eine klare Prioritätensetzung auf Forschung, Bildungsangebot und steigende Studierendenzahlen.

- ➔ **Einsparererfolge bei Energie und CO₂ sind an zusätzliche Förderungen für Forschung und Bildung zu knüpfen, indem nachhaltigem Engagement mehr Bedeutung beigemessen und die Etablierung in Verwaltungsstrukturen sichergestellt wird.**
- ➔ **Umsetzungspläne vom Land sind mit finanziellen und personellen Ressourcen auszustatten.**
- ➔ **Sonderforschungsbereiche können an betriebswirtschaftliche Einsparungen geknüpft werden.**

Die finanzielle Ausstattung der Landesverwaltung für die Sanierung der Landesbauten ist, wie den vorangegangenen Ausführungen zu entnehmen ist, nicht ausreichend um den Primärenergieverbrauch durch Modernisierung bzw. Sanierung in einem Sanierungsschritt zu senken und den CO₂-Ausstoß gemäß den gesteckten Klimaschutzzielen zu reduzieren. Aus finanziellen Gründen sind meist Teilsanierungen geplant, da vollständige Sanierungen den verfügbaren finanziellen Rahmen überschreiten. Eine bis zu 80 % ige Sanierung nach ENEV bzw. GEG-Standards am Einzelgebäude ist besonders bei Denkmal geschützten Gebäuden sehr kostenaufwendig.

- ➔ **Deshalb stellen die erneuerbaren Energien einen hohen Stellenwert in der Sanierungsfrage zur Erreichung der Klimaschutzziele dar.**

Allerdings werden Gebäude, die einen höheren Sanierungsbedarf als ihren Immobilienwert aufweisen, als *Stranded Investments* abgestoßen bzw. veräußert. Um die Kosten für Gebäudesanierungen geringer zu halten, werden *Stranded Investments* an Privatinvestoren günstig verkauft, wodurch sie eine Wertsteigerung erfahren. Meist sind davon Denkmal geschützte Gebäude betroffen, deren Sanierungsaufgaben den staatlichen Finanzrahmen und die gesamte Ökobilanz belasten. Hier setzen Diskussionen des Denkmalschutzes zum kulturellen Erbe an, die eine Übertragung der Klimaschutzziele auf das ohnehin geringe kulturelle Erbe ablehnen.

- ➔ **Streitfragen bestehen weiterhin dort, wo erneuerbare Energien das kulturelle Erbe gefährden. Hier sollte eine Nutzungsänderung und Verbrauchssenkung priorisiert werden, statt kulturelles Erbe zu verändern.**

Neubauten erfüllen die strengen energetischen Vorgaben des GEG. Dabei wird zunehmend auf den Bau von Holzhäusern gesetzt, die nicht für alle Nutzungsfunktionen staatlicher Einrichtungen geeignet sind. Die Nutzungsart bestimmt den Energieverbrauch sowie die Anforderungen an die gebäudetechnische Ausstattung. Je nach Nutzungsart kann ein Gebäude effizient eingesetzt werden und spart dadurch Energie und Ressourcen. Zur energetischen Sanierung gehört der Austausch veralteter Heizsysteme, die kompatibel mit Brückentechnologien auf Ebene der lokalen Energieinfrastrukturen ausgestattet sind.

- ➔ **Spezifische Fragen zur Gebäudesanierung und unterschiedlichen Energiespeichersystemen mit Kraft-Wärmekopplung konnten in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden, da es den Rahmen sprengt.**

Das Institut für Solare Energiesysteme hat aktuell einen ganzheitlichen Lösungsansatz für die Sanierung von Liegenschaften veröffentlicht. In der Studie wird insbesondere die Organisation erforderlicher Maßnahmen und deren intelligente Planung durch Verwaltung und Wissenschaft vorgestellt, um bis 2030 klimaneutral zu werden. Die Entwicklung, Anwendung und Demonstration ganzheitlicher Lösungen für klimafreundliche Organisation und Liegenschaften *Zeit Best-Practice*-Beispiele und quartiersbezogene Ansätze. Das spricht für die Gesamtbetrachtung des Gebäudebestandes, um energetische Ausreißer unter den Gebäuden zu identifizieren (ISE 2021):

- ✓ Untersuchungen zu Strom- und Wärmespeicherung sind in großflächigen Gebäudekomplexen und Quartieren zu integrieren, die die erforderliche Speicherdauer in Abhängigkeit von Tageslastgängen und im Jahresverlauf konfigurieren.
- ✓ Dies spricht für Quartierskonzepte, um großräumigere Lösungen zu erarbeiten, die in ihren Betrachtungen besonders energieeffiziente Neubauten in einem Quartier mit in die Gesamtstatistik einfließen lassen und diese stark positiv beeinflussen.
- ✓ Überwiegend sind Quartiers übergreifende Konzepte für Sanierungen erforderlich, um Denkmal geschützte Gebäude mit zu versorgen aber baulich weitestgehend zu erhalten.

10. Ausblick

Lebens- und Mobilitätseinschränkende Maßnahmen während den Corona-Jahren 2020-2022 haben gezeigt, dass CO₂-Einsparungen durch gezieltes Handeln möglich sind, wenn auch die Motivation bei der Pandemie eine andere als der Klimaschutz ist. Nach Corona ist wieder mit einem starken Anstieg der CO₂-Emissionen zu rechnen. Studien dazu haben ergeben, dass gezielte Maßnahmen zu einer Senkung des CO₂-Ausstoßes führen können und nun eine genaue Vorstellung davon besteht, was in welchem Umfang getan werden kann, um CO₂-Emissionen zu senken (nach Quaschnig 2020).

Die Auswirkungen des Krieges in der Ukraine forcieren politische Entscheidungen zur Reduzierung des Erdgasverbrauchs und des Heizöls und treiben die Energiewende stark voran. Die Abschaffung der EEG-Umlage ab 2023 und die Einführung einer Erdgas-Umlage sowie steigende Energiepreise und zusätzliche CO₂-Steuern beschleunigen den Ausbau erneuerbarer Energien, insbesondere Windkraft wird intensiv debattiert. Dies hat verschiedene Vorteile in Bezug auf die Dezentralisierung der Energieinfrastruktur und die zunehmend unabhängige Energieversorgung durch lokale und regionale Alternativen.

Nochmals rückblickend auf das bereits Erwähnte - **geht kein Weg an der Suffizienz vorbei!** Die **Grand-Challenge 2030**, vor der wir stehen, kann theoretisch nur erreicht werden, wenn ausblickend in die Zukunft Folgendes berücksichtigt wird:

- Interne Informations- und Entscheidungswege stark beschleunigen und Umsetzungs- und Genehmigungsverfahren mit hoher Priorität versehen.
- Sanierungsrate erhöhen und Sanierungsmaßnahmen und Bauvorhaben vorziehen.
- Finanzielle Vorteile wie Einspeisevergütungen verlieren dann an Bedeutung, wenn sie einen zu hohen Abrechnungsaufwand verursachen und damit wichtige Kapazitäten für weitere Umsetzungen blockieren.
- Finanzielle Hilfen im Voraus leisten und auf umfangreiche Ausschreibungsverfahren verzichten – Kann ein staatlicher Plan an der Planwirtschaft orientiert werden?

➔ **Die Ergebnisse dieser Arbeit können hier zeitsparend wirken.**

10.1. Erweiterung der Geodatenbasis- Wieso nicht Kompetenzen nutzen?

Im Rahmen einer Projekterweiterung zur Fertigstellung eines dreidimensionalen Campusmodells können bereits vorhandene Informationen zu Gebäuden, Verkehrsführung innerhalb der Universitätsstadt, Orientierungshilfen und Campusnavigation für Studierende verbunden werden und darüber hinaus zwischen Wissenschaft und Verwaltung Synergien schaffen.

Für diese Erweiterung sind die Dachstrukturen bereits im Oberflächenmodell der LIDAR-Geodatenbasis vorhanden. Mit hochauflösenden Luftbildern erhält das 3D-Modell eine photographische Ansicht. Der Aufbau eines 3D-Modells mit LOD 1- sogenannter *Level of Detail* bis zu einem LOD 2 ist sehr aufwendig. Da LOD 1 ein Klötzchen-Modell darstellt, sind darin zwar die Gebäudegrundrisse vorhanden jedoch noch keine Fassaden und Dachstrukturen erkennbar. Die Digitalisierung der Fassaden ist erforderlich, die in Verbindung

mit thermographischen Aufnahmen einen 3D-Wärmeatlas des Gebäudebestandes erschafft. Projekte mit diesem Verfahren sind beispielsweise das Stadtmodell Ludwigsburg, indem ein Stadtquartier mit 160 Gebäuden im Rahmen des Projekts *Klimaneutrale Kommune Ludwigsburg* mit LOD 2 erstellt wurde, um den Wärmeverbrauch unterschiedlicher Gebäudeklassen zu simulieren. Es wurde dabei der durchschnittliche Heizwärmebedarf pro Gebäudetyp klassifiziert (COORS, 2014:20ff).

Mit Blick auf die angestrebte Wärmewende ist ein 3D-Wärmeatlas ein wichtiges Folgeprojekt, dass die Sanierungsplanung gezielt unterstützen und auf kommunale Ebene ausweiten kann. Zusätzlich zum 3D-Gebäudemodell kann der geologische Untergrund mitaufgenommen werden, indem eine 3D-Simulation den Bereich unterhalb des Gebäudebestandes darstellt und weitere geowissenschaftliche Projekte ermöglicht. Eine interaktive Visualisierung des Untergrundes verbunden mit gebäudespezifischen Daten ermöglichen Anwendungsszenarien in vielen Bereichen der Geowissenschaften.

- ✓ **Ein digitalisiertes 3D-Universitätsmodell ist eine vorteilhafte Weiterführung des Projekts.**

10.2. Potenzialanalyse zu Solarthermie auf Universitätsdächern

Naheliegender sind Potenzialanalysen zu Solarthermie, da die Solarpotenzialanalyse die erforderlichen Einstrahlungswerte an direkter und diffuser Strahlung enthält, die für die technischen Berechnungen von solarthermischen Paneelen benötigt werden. Ergänzend zur Berechnung des Strompotenzials aus Photovoltaik kann hier das Wärmepotenzial auf den Dächern ergänzend berechnet werden. Für Solarthermie-Anlagen auf den Dächern ist eine ausreichende Tragfähigkeit durch Architekten und Statiker zu gewährleisten.

Für die Solarenergie aus Photovoltaik bestehen durch aufgeständerte PV-Module weitere Untersuchungsmöglichkeiten. QUASCHING (2018) hat bereits ein Berechnungsmodul veröffentlicht, das den optimalen Abstand und den wandernden Schattenverlauf zwischen den schräg gestellten Paneelen berechnet, da eine Teilverschattung zum Abschalten der Module führt. Auch bei Schneebedeckung ist dies ein wichtiger Aspekt, um keine unterschiedlichen Produktionszeiten zu erhalten. Das realisierbare PV-Potenzial lässt sich durch diese Berechnungen optimieren, indem auf derselben Dachfläche bis zu 50 % mehr Module installiert werden können, ohne dass der Energieertrag sinkt. Abschattungsverluste können minimiert und die installierte Photovoltaikleistung auf Flachdächern erhöht werden. Auch schattentolerante Photovoltaikmodule in Verbindung mit Kleinwechselrichtern sowie die Nutzung von Fassaden erhöhen den Ertrag, womit das Gesamtpotenzial für Photovoltaik nochmals steigt (QUASCHNING & Hanitsch 1998). Dies kann ebenfalls in einem 3D-Modell simuliert werden.

10.3. Flachdach-Analyse für Dachbegrünung als CO₂-Bindungsmaßnahme

Ergänzend zu den Solarpotenzialanalysen, kann eine Flachdachanalyse zur Identifikation geeigneter Dächer für Begrünungen beitragen. Die Dachbegrünung ist eine CDR – Maßnahme (Carbon Dioxid Removal), die CO₂ aus der Atmosphäre entfernt und als CO₂-Bindungsmaßnahme gilt. Viele der Universitätsgebäude besitzen Flachdächer, auf denen wegen der Installation von Neigungsrahmen nur ca. 60 % der Dachfläche

nutzbar bleiben. Mit Hilfe der 3D-Modelle können an den Gebäuden der Universität auch begrünte Fassaden simuliert und berechnet werden, die ebenfalls als CDR-Maßnahmen gelten. Es sind Kombinationsmöglichkeiten von Gründächern mit PV-Modulen möglich.

Vor dem Hintergrund der Diskussionen um die Verbrauchsreduzierung, gewinnen CO₂-Bindungsmaßnahmen besonders an Bedeutung. Dazu gehören Maßnahmen, die CO₂ aus der Atmosphäre entnehmen können wie z.B. Bewaldung, CO₂-Filterung, Begrünung und viele innovative Verfahren zur Entnahme von Treibhausgasen aus der Atmosphäre. Die Fördermaßnahme CDRterra des BMBF (FONA 2022) unterstützt Projekte die politischen, ökologischen, technischen und gesellschaftlichen Fragen zu CDR-Methoden erforschen. CO₂-Entnahmemaßnahmen werden in der CO₂-Bilanzierung als CO₂-Kompensationsmaßnahme angerechnet und bieten gute CO₂-Reduzierungsmöglichkeiten.

10.4. Sonderforschungsbereich „Campus goes CO₂₀₃₀“- Ein exzellentes Klimaschutzkonzept?

Zwar verfügen einige Universitäten und Hochschulen bereits in der Leitbildformulierung, die sich zu einem ressourcenschonenden und umweltbewusstes Verhalten verpflichten. Jedoch fehlen der Formulierung meist konkrete Bekenntnisse. Beispielsweise können sich Leitbilder an genormten Standards (DIN, ISO) orientieren. Prozessanalysen decken auf, wo Optimierungen notwendig sind und Strukturen zu verbessern sind. Der Zeitrahmen bis 2030 ist sehr knapp bemessen und kann nur durch die Bündelung aller Kompetenzen zu einer klimaneutralen Universität führen. Ein gemeinsamer Forschungs- und Innovationscampus der ab 2030 klimaneutral ist, kann die Begründung für einen Sonderforschungsbereich liefern.

Die Zusammenführung bisheriger Forschungen in den Fachbereichen Nachhaltigkeit, Klimaschutz und Energieversorgung kann in einem innovativen Forschungsprojekt münden, das Kompetenzen an der Universität Tübingen verbindet, die bisher an Segmenten eines nachhaltigen Campuskonzepts geforscht haben. Eigene Sonderforschungsbereiche, die Synergien zwischen der Angewandten Wissenschaften, den Naturwissenschaften und den Forschungsbereichen von Nachhaltigkeit und Klimaschutz schaffen, können individuelle Lösungen hervorbringen. Konkrete Forschungsfragen zu Klimaschutz und Klimatologie, Physik und Bauphysik, Informatik und künstliche Intelligenz sind in der interdisziplinären Zusammenarbeit essentiell. Die Unterstützung für die Universitätsleitung und Verwaltung ist enorm und weiter ausbaufähig, bedarf allerdings zunehmender Koordination und Zielführung. Einzelne Arbeitsbereiche eines Forschungsprojekts können die Evaluierung nachhaltiger Maßnahmen erarbeiten, die Umsetzungsvorgänge hemmen und die Frage beantworten wie sie zu beschleunigen sind. Die Implementierung von Geodaten in ein universitätsinternes Verwaltungssystem zur Unterstützung der nachhaltigen Entwicklung kann sich auf einzelne Bereiche der Nachhaltigkeit beziehen und an bereits implementierten Systemen ansetzen.

Weiterführende Szenarien können in Bezug auf nicht erfüllte Klimaschutzziele aufgestellt werden, um die CO₂-Steuern und steigende Energiepreise zu simulieren. Der zukünftige Landeshaushalt und der Finanzierungsrahmen der Universität können durch eine hohe Eigenproduktion entlastet werden. Dabei kann berücksichtigt werden, welche Einnahmen z.B. durch Flächenvermietungen möglich sind. Und welche CO₂-Bindungs- und Kompensationsmaßnahmen umsetzbar und anrechenbar sind. Weiter können CO₂-Fußabdruck und -Handabdruck öffentlich diskutiert und Initiativen für die Unterstützung engagiert werden.

Persönlicher Kommentar

Abschließend wird kommentiert, dass die Erreichung der Klimaschutzziele 2030 - je nach Ausgangslage der Institution – nur erreichbar sind, wenn die Potenzialanalyse für eine Umrüstung auf erneuerbare Energien bereits vorliegt, eine Bestandsanalyse zum Gebäudezustand und Sanierungsbedarf ebenfalls erfolgte sowie ein Maßnahmenkatalog mit einer Kostenkalkulation erstellt wurde. Kurz, wenn gute Vorarbeiten geleistet wurden, dann können die verbleibenden Jahre für die Umsetzung der erforderlichen baulichen und verhaltensbedingten Maßnahmen ausreichen. Andersfalls nehmen die Vorarbeiten zu viel Zeit in Anspruch. Zudem bedarf es einer internen Abstimmung und Einigung über die zu investierenden Finanzmittel. Andersfalls benötigt allein die Ist-Analyse einen Großteil der Zeit und der personellen Kapazitäten, um zunächst zu erarbeiten, was es für die Klimaneutralität bis 2030 bedarf.

Mit einer finanziellen Kalkulation der erforderlichen Kosten und den möglichen langfristigen Entlastungen, die durch eine Umrüstung entstehen könnten, kann eingeschätzt werden, ob diese Kosten überhaupt tragbar sind. Werden die Rahmenbedingungen dafür nicht geschaffen oder treten weitere unvorhersehbare Faktoren auf, die die Bau- und Energiewirtschaft langfristig beeinflussen, kann Klimaneutralität erst zu einem späteren Zeitpunkt realisierbar sein.

Grundsätzlich ist es hilfreich, anhand einer Bestands und Potenzialanalyse ein Planspiel durchzuführen, um damit unterschiedliche Möglichkeiten zu betrachten und deren rechnerische Herausforderungen zu erkennen. Denn dass eine CO₂-Bilanzierung erforderlich ist, steht nun fest. Die Entscheidungen für einzelne Maßnahmen nehmen den übrigen Teil des verbleibenden Zeitraums in Anspruch, sodass im Jahr 2030 über anrechenbare Möglichkeiten der CO₂-Kompensation in der CO₂-Bilanzierung diskutiert werden muss. Auch dafür sind Berechnungen zu Einzelmaßnahmen wie die Installation von Photovoltaik sehr hilfreich. Am Ende steht die Verbrauchssenkung als wichtigste Verantwortung des Gebäudenutzers im Vordergrund. Wird hier nicht massiv umgedacht und eingespart, dann bleibt letztlich noch die Option der teilweisen Abschaltung. Und auch das ist nur in einem gewissen Rahmen möglich, denn „wo gehobelt wird, da fallen Späne“.

Ihre

Sandy-Cheril Manton

XI. Literaturverzeichnis

A

Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (Hrsg.) (2010): Potenzialatlas Deutschland, Agentur für Erneuerbare Energien 2020, Berlin, Februar 2010.

Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (Hrsg.) (2019): Unendlich viel Energie, Berlin, 2018, verfügbar unter: <https://www.unendlich-viel-energie.de/index.php/cat/173> abgerufen am 4.5.2019.

Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (Hrsg.) (2020): Stromversorgung 2020, Wege in eine moderne Energiewirtschaft, Berlin, Januar 2010.

Albers, H.-H. (2016): Corporate Urban Responsibility. Die gesellschaftliche Verantwortung von Unternehmen in der Stadtentwicklung. Campus Verlag GmbH, Frankfurt.

Altwater, E. & Hans-Werner Sinn (2006): Allokationsplan des Sachverständigenrates für Umweltfragen, Carbon Accounting, Nationales Klimaschutzprogramm von ICAP International Carbon Action Partnership, im Auftrag des Ifo Instituts, Berlin 2006.

Amt für Vermögen und Bau (VBA) Tübingen (2011-2015): Datengrundlage für Sanierungsdaten, Gebäude, Amtsleiter Bernd Selbmann, (Ort), 2011.

Amt für Vermögen und Bau (VBA) Ravensburg (2017-2018): Energiemanagement, Strukturverwaltung energetische Sanierungen. Joachim Clauß, 2018.

Appelrath et. al. (2011): Deutschlands Energiewende kann nur mit Smartgrid gelingen. Projekt Future Energie Grid, acatech, Deutsche Akademie der Technikwirtschaft, München 2011.

Arbeitsgemeinschaft für industrielle Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AIF)(Hrsg.): RegioEnergie, Regenerative Energien und regionalwirtschaftliche Potenziale, in Zus. m. Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg, Hochschule für Technik Stuttgart, Endbericht Juli 2009, Stuttgart.

Architektenkammer Baden-Württemberg (2021): Energieausweis (Quelle Architektenkammer Baden-Württemberg 2021), Stuttgart, 2021, verfügbar unter: <https://www.akbw.de/service/fuer-bauherrinnen-und-bauherren/energieeffizienz/energieausweis.html>, abgerufen am 07.08.2021.

Arndt, D. (2008): Geologische Strukturmodellierung von Hessen zur Bestimmung von Geopotenzialen. Dissertation an der Universität Darmstadt. Darmstadt 2008.

B

Bach, St.; E. Wittenberg (2019): "Eine CO₂-Steuer soll die ökologischen Steuern weiterentwickeln", DIW-Wochenbericht, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2019) Vol. 86, Iss. 13, pp. 232, http://dx.doi.org/10.18723/diw_wb:2019-13-3. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/10419/195148>, abgerufen am 4.5.2019.

Baerlocher, Bianca (2013): Natur und soziales Handeln. Ein sozialtheoretischer Beitrag für die Nachhaltigkeitsforschung, Campus Verlag, Frankfurt 2013.

Bärwaldt, K.; B. Leimbach, Fr. Müller (2009): Global emissions trading: a solution of the climate challenge? - Internat. Policy Analysis, Division for Internat. Dialogue, Berlin. 19 S. verfügbar unter: <http://library.fes.de/pdf-files/id/ipa/06385.pdf>, erneut abgerufen am 4.5.2019.

(Bassen 2017): Bassen, A., Schmitt, C.T. & Stecker, C. Nachhaltigkeit an Hochschulen: entwickeln – vernetzen – berichten (HOCH^N). *uwf* 25, 139–146 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00550-017-0450-y>, Hamburg.

(Bassen 2018): Bassen, A., et al. (2018): Anwendung des hochschulspezifischen Nachhaltigkeitskodex—Ein Weg zur Nachhaltigkeitsberichterstattung an Hochschulen (Betaversion). *BMBF-Projekt "Nachhaltigkeit an Hochschulen: Entwickeln-ernetzen-berichten (HOCH-N)"*: Hamburg, Germany (2018). Verfügbar unter: <https://www.deutscher-nachhaltigkeitskodex.de/de-DE/Documents/PDFs/Leitfaden/Hochschul-DNK.aspx>, abgerufen am: 12.3.2019.

- (BAUM 1984): Bundesdeutscher Arbeitskreis für umweltbewusstes Management (B.A.U.M.) e.V. (1984): Umweltcheckliste, Hamburg 1984.
- (BAUM 2022): Bundesdeutscher Arbeitskreis für umweltbewusstes Management (B.A.U.M.) e.V. (2022): Digitalisierung und Nachhaltigkeit, Hamburg 2022.
- (BDEW 2019): Schwencke, T., & Bantle, C. (2019): BDEW Strompreisanalyse Januar 2019-Haushalte und Industrie. In: BDEW-Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 1, 1-48, Berlin 2019.
- (BDEW 2022): Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., (2022): Strompreise für die Industrie. verfügbar unter: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>, abgerufen am 28.5.2022
- Becker, S., & Naumann, M. (2018): Energiekonflikte erkennen und nutzen. In *Bausteine der Energiewende* (pp. 509-522). Springer VS, Wiesbaden. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-19509-0_25, abgerufen am 18.9.2022.
- Bellina, L., et al. (2018): Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) in der Hochschullehre (Betaversion). In: BMBF-Projekt 'Nachhaltigkeit an Hochschulen: Entwickeln-ernetzen-berichten (Hoch-N): Bremen/Tübingen 2018.
- Benenson, Z. (2022): Datenschutz im Internet der Dinge, Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen e.V. verfügbar unter: <https://www.verbraucherforschung.nrw/sites/default/files/2022-02/zth-14-benenson-datenschutz-im-internet-der-dinge.pdf>, abgerufen am 04.09.2022.
- Benfer, H.-J. (2008): AERO-Solar Solarpotenzialanalyse in 3D Stadtmodellen. - Geoinformatik 2010, Universität Heidelberg, Tagungsband 2010: 191-198. Heidelberg 2008.
- (BGR 2010): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2010): Tiefe Geothermie, Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland, Prof. Dr. Ralf Watzel (Hrsg.) für die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Referat Öffentlichkeitsarbeit, Berlin 2010.
- (BGR 2016): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2016): Preismonitor Januar 2017, Rohstoffagentur, Berlin 2017.
- (BGV 2021): Bundesverfassungsgericht (2021): Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise Erfolgreich, Pressemitteilung Nr. 31/2021 vom 29. April 2021, Beschluss vom 24. März 2021: Verfügbar unter: <https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html> , abgerufen am 16.06.2021.
- (BMUV 2008): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2008): Erneuerbare Energien, Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft, Berlin 2008.
- (BMUV 2009a): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) EnEV-Energieeinsparverordnung 2009: Berlin. Nicht mehr unter BMUV verfügbar: Frei verfügbar unter: https://enev-online.org/enev_2009_volltext/enev_2009_anlage_03_anforderungen_aenderung_aussenbauteile.htm, abgerufen am 15.9.2022.
- (BMBF 2014): Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Forschung für Nachhaltige Entwicklung FONA³, Rahmenprogramm des BMBF, Referat Grundsatzfragen, Nachhaltigkeit, Klima, Energie. Bonn/Berlin 2014. Frei verfügbar unter: <https://www.fona.de/dehttps://www.fona.de/de/>, abgerufen am: 22.04.2017.
- (BMBF 2015): Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): strategischen Forschungs- und Innovationsagenda (FINA), Zukunftsstadt 2015 - Nationale Plattform Zukunftsstadt. Referat Nachhaltigkeit, Klima, Energie Bonn/Berlin 2015. Verfügbar unter: <https://www.fona.de/medien/pdf/Zukunftsstadt.pdf>, abgerufen am 24.04.2017.
- (BMBF 2016): Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Forschungsförderung, Horizon 2020-2050, Infographiken. Berlin 2016 Verfügbar unter: http://www.bmbf.de/mediathek/pdf/horizon2020_deutsch_barrierefrei.pdf, abgerufen am: 22.04.2017.
- (BMJV 2017): Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz 2020: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017) Paragraph § 49: Absenkung der anzulegenden Werte für Strom aus

solarer Strahlungsenergie. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/___49.html, abgerufen am 18.2.2020).

(BMJV 2020): Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (GebäudeEnergieGesetz - GEG), verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf>, erneut abgerufen am 16.9.2022.

(BMJV 2021): Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz 2020: Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) 12.12.2019. Berlin. verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>, erneut abgerufen am 16.9.2022.

(BMUV 2009b): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2009): Erneuerbare Energien in Zahlen, Nationale und Internationale Entwicklung, Berlin 2009.

(BMUV 2010): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2010): DIN EN 16001: Energiemanagementsysteme in der Praxis. Ein Leitfaden für Unternehmen und Organisationen, Berlin 2010.

(BMUV 2015): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2015): Zukunftstadt. Strategische Forschungs- und Innovationsagenda. Aktualisierung 2015, Berlin. Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/31014_Zukunftstadt.pdf?__blob=publicationFile&v=3, abgerufen am 15.12.2016.

(BMUV 2016): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016): Leitfaden für nachhaltiges Bauen, Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden. Hrsg. von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumordnung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Referat II 5 – Nachhaltiges Bauen, Berlin 2016.

(BMUV 2017): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2017): Energieeinsparverordnung (EnEV), Berlin 2017. verfügbar unter: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Energieeffizient_Bauen/energiesparverordnung_lesefassung_bf.pdf, abgerufen am 22.04.2017.

(BMUV 2018): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2018): Die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Aktualisierung 2018. Beschluss Bundeskabinett vom 7.11.2018, Berlin. Verfügbar unter: www.bmub.bund.de/themen/ Zugriff am 15.12.2018.

(BMUV 2019): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2019): Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), Berlin 2019. verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>, abgerufen am 16.06.2021.

(BMUV 2020): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2020): Wegweiser in ein klimaneutrales Deutschland, Berlin 2020. verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/klimaschutzplan-2050-kabinett-beschliesst-wegweiser-in-ein-klimaneutrales-deutschland>, abgerufen am 10.08.2022.

(BMVI 2016): Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016): Europäische Kommission, Forschungsinformationssystem (FIS) Verkehr und Mobilität. verfügbar unter: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/3529/> abgerufen am 5.5.2019.

(BMW i 2011): Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW i) (2011): Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Berlin 2011.

(BMW i 2014a): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW i): Die Energiewende – ein gutes Stück Arbeit: Wirtschaftliche Impulse durch erneuerbare Energien, Zahlen und Daten zum Erneuerbaren-Ausbau als Wirtschaftsfaktor - gestrichen: Nachteile. Die EEG-Reform. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz 2014. Die wichtigsten Fakten zur Reform des EEG, Berlin 2014.

(BMW i 2014b): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW i): Zweiter Monitoring Bericht, Energie der Zukunft, Berlin 2014.

(BMW i 2016): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW i): Erneuerbare Energien. Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch und am Bruttoenergieverbrauch und AGEE-Stat. Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland, Stand Sept. 2016, Berlin 2016.

- (BMWi 2018): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): EEG-Umlage: Fakten & Hintergründe. Energiewende Umschalten auf Zukunft. verfügbar unter: <https://www.netztransparenz.de/EEG/Datenmeldung-EEG-Umlage>, erneut abgerufen am 17.06.2022.
- (BMWK 2016b): Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2016): Beschluss Bundeskabinetts. Klimaschutzplan 2050 -Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-klimaschutzplan-2050.html>, abgerufen am 15.12.2016.
- (BNA 2020): Bundesnetzagentur: 2020 - Umlage sinkt im Jahr 2021, Berlin, 2020. verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/20201015_EEGUmlage.html, abgerufen am 15.10.2020.
- Bödinger, Chr. (2015): 3D-Untergrundmodellierung zur oberflächennahen Geothermie im Stadtgebiet Tübingen, Bachelorarbeit im Projekt "Innovatives Energie- und Umweltkonzept der Universität und des Universitätsklinikums Tübingen." Universität Tübingen. 2015.
- Boehner, J., Antonic, O. (2009): Land Surface Parameters Specific to Topo-Climatology. In: Hengl, T. & Reuter, H.I. [Eds.]: Geomorphometry - Concepts, Software, Applications. Newnes 2009.
- Bormann, I., et al. (2018): Nachhaltigkeitsgovernance an Hochschulen (Betaversion). In: *BMBF-Projekt "Nachhaltigkeit an Hochschulen: Entwickeln-vernetzen-berichten (HOCH-N)"*: Berlin 2018.
- Bortz; Döring (2006): Forschungsmethoden und Evaluation für Human und Sozialwissenschaftler, 900 S., 4. Auflage, Springer Spektrum Verlag, Heidelberg 2006.
- Bosch, P. (2010): Raum und Erneuerbare Energien, Anforderungen eines regenerativen Energiesystems an die Standortplanung, in STANDORT (Ausgabe 12/2010), Zeitschrift des Deutschen Verbandes für Angewandte Geographie, Springer Spektrum Verlag, Heidelberg 2010.
- Bowens, H.- R. (1953): *Social Responsibility of the Business man*. 298 S., University of Iowa Press; Auflage: Reprint. Iowa 1995.
- Brauweiler, Jana (2017): Das „Baukastensystem Nachhaltiger Campus “– ein Instrument zur Umsetzung von Nachhaltigkeitsmanagement und-berichterstattung an Hochschulen." In: *uwf UmweltWirtschaftsForum* 25.1 (2017): 147-157. Heidelberg 2017.
- (BRD 1980): Deutscher Bundestag (1980) Bundesberggesetz (BBergG) vom 13.8.1980. Bundesamt für Justiz, Bonn 1980, verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/BJNR013100980.html> , abgerufen am 10.9.2022.
- (BRD 2007): Deutscher Bundestag (2007): CO₂-Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich, Zur Klimafreundlichkeit von fossilen Energien, Kernenergie und erneuerbaren Energien, Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages, Fachbereich WD Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und Forschung: 8-056/2007. Berlin.
- (BRD 2013): Deutscher Bundestag (2013) Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts - Wasserhaushaltsgesetz (WHG) von 2009. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/index.html, abgerufen am 10.9.2022.
- (BRD 2016a): Deutscher Bundestag (2016): Erneuerbares Energie Gesetz (EEG), Berlin. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/, abgerufen am 10.9.2022.
- (BRD 2016b): Deutscher Bundestag (2016): Erneuerbares Wärme Energie Gesetz (EEG-Wärme), Berlin 2016. Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich. *Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz-EEWärmeG. Bundesgesetzblatt (36)*, 1658-65. Berlin 2016.
- (BRD 2019): Deutscher Bundestag (2019): Brennstoffemissionsgesetz (BEHG). Aktualisierung 2020. Beschluss Bundeskabinetts vom 3.11.2020, Berlin. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/behg/BJNR272800019.html>, abgerufen am: 15.12.2020.
- Brücher, W. (2009). Energiegeographie. Wechselwirkungen zwischen Ressourcen, Raum und Politik. Gebr. - 280 S., Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 2009.
- Brücher, W. (2010). Energiegeographie. *Die Erde, 1, 2*. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 2010.

Brückner, MT., Lakes (2012): Solarpotenzialkataster als lokale Anwendungen im Kontext der Europäischen Geodateninfrastruktur. In: GIS.SCIENCE. Zeitschrift für Geoinformatik: Solarpotenzialkataster, Themenheft 2/2012: 83-90. 2012. Wichmann Verlag, Offenbach a. M. 2012.

Bruhn, M., & Hadwich, K. (2022). Smart Services im Dienstleistungsmanagement–Erscheinungsformen, Gestaltungsoptionen und Innovationspotenziale. In *Smart Services* (pp. 3-60). Springer Gabler, Wiesbaden 2022.

Brühne, Thomas (2009): Erneuerbare Energien als Herausforderung für die Geographiedidaktik, Perspektiven der Integration in Theorie und Praxis. 408 S., VS Verlag für Sozialwissenschaften; Wiesbaden 2009.

Brunotte, M. & Stephan Schrode (2010): Integriertes Klimaschutz- und Energiekonzept für Rottenburg am Neckar, Projektabschlussbericht, Potenziale, Rottenburg a. N. 2010.

Bundesverband Geothermie (2014): Wieviel CO₂ kann man mit Geothermie einsparen? Nicht mehr verfügbar unter: <http://www.geothermie.de/news-anzeigen/2014/08/11/30-wie-viel-co2-kann-man-mit-geothermie-einsparen.html>, abgerufen am: 13.7.2017. nicht mehr abrufbar.

Burtraw, Dallas, Palmer, Karen L., Munnings, Clayton, Weber, Paige, Woerman, Matt (2013): Linking by Degrees, Incremental Alignment of Cap-and-Trade Markets. - SSRN Electronic Journal. 2013, verfügbar unter: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2249955, erneut abgerufen am 4.5.2019.

(BWP 2021): Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V. (2021): Funktion & Wärmequellen: verfügbar unter: <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktion-waermequellen/>, abgerufen am 21.12.2021.

C

Cama, M., Schillaci, C., Kropáček, J., Hochschild, V., Bosino, A., & Märker, M. (2020). A probabilistic assessment of soil erosion susceptibility in a head catchment of the Jemma Basin, Ethiopian Highlands. *Geosciences*, 10(7), 248.

Chevalier, J. M. (2009): The new energy crisis. In *The New Energy Crisis* (pp. 6-59). Palgrave Macmillan, London. 2009:6-59. London 2009.

Coors, V. (2014): Das Hamburger Stadtmodell, Der Wiederaufbau des Berliner Schlosses. In: Business Geomatics. Magazin Fokus 2/2014, 3D-City und Gebäudemodelle. Braunschweig.

Corbach, M. (2007): *Die deutsche Stromwirtschaft und der Emissionshandel*. ibidem-Verlag, Stuttgart 2007.

Corbach, M. (2012). *Die deutsche Stromwirtschaft und der Emissionshandel* (Vol. 5). ibidem-Verlag/ibidem Press. Stuttgart 2012.

Corradini, R. et al (2014): Solarthermie- Technik, Potenziale, Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz für solarthermische Systeme in Einfamilienhäuser. Ein Forschungsprojekt der Wüstenrot Stiftung in Zusammenarbeit mit der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. Wüstenrot Stiftung Ludwigsburg (2014) Stuttgart.

D

Delokowitz, B., A. Hoffemann, M. Will (2005): Vom operativen Umweltmanagement zum Leitmotiv „nachhaltige Entwicklung“, das Beispiel der Hochschule Zittau/Görlitz (FH).

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) (2016): Das DGNB-Zertifikat für Gebäude im Betrieb GIB15. Kriterien für das DGNB-Nutzungsprofil „Gebäude im Betrieb“. Stand 28.4.2016. DGNB GmbH Berlin, Stuttgart.

DIN 2022): DIN Normenausschuss Lichttechnik (FNL) Grundlage für Tagesgang, Sonnenstandssimulation mit Algorithmen, verfügbar unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/fnl/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:337708525> , abgerufen am 20.22.2022.

Domscheid, S. (2010): Einführung für CAFM-Systeme an Hochschulen. HIS Forum Hochschule 9/2010, Hannover.

DOKONARA 2014: Doktorandenkolleg 2014 Lichtenstein. Diskussionen um die Energiewende: Mündliche Zitate von Prof. Dr. Droege. S.33/34 dieser Arbeit), Lichtenstein.

DocuWare (2022): Graphik Facility-Management –CAFM. Verfügbar unter: https://www.facility-management.de/artikel/fm_Dokumenten-Management-Systeme_2778562.html, abgerufen am 11.9.2022.

(DWD 2012): Deutscher Wetterdienst Stuttgart (2012): Daten des Deutschen Wetterdienstes für das IQF-Projekt, Daten enthalten: Langjähriges Mittel 1981-2010. Rasterdaten, Gauß-Krüger-Koordinatensystem/ Potsdam Datum.9. Längengrad (DHDN 3) Zeilen 726 bis 733, Wertespalten 222-228, 2011, Hamburg.)

Droege, P. (2006): The renewable city: a comprehensive guide to an urban revolution, University of Liechtenstein, verfügbar unter: <https://library.wur.nl/WebQuery/titel/1928831> , erneut abgerufen am 4.5.2019.

Droege, P. (2013): Ins Solare Zeitalter: ein Blick zurück – ein Sprung nach vorne. Acht Punkte zu Eurosolars 25. Geburtstag“. - Solarzeitalter No. 3, 2013. Sonderausgabe 10 Jahre Eurosolar. Verfügbar unter: <https://www.eurosolar.de/en/index.php/text-and-media/press-releases-eurosolar/842-urban-energy-transition-2-renewable-strategies-for-cities-and-regions-by-eurosolar-president-prof-peter-droege> , erneut abgerufen am 20.11.2022.

Droege, P. (2014): Regenerative Regionen, Energie- und Klimaatlas Bodensee-Alpenrhein, Climate Partner-klimaneutral, Oekom Verlag, München.

Droege, P. & J. Knieling (Hrsg.) (2017): Regenerative Räume: Leitbilder und Praktiken nachhaltiger Raumentwicklung, Oekom Verlag, S. 298, München.

Droege, P. (2020). The Renewable City: The Future of Low-Carbon Living. In *Accelerating the Transition to a 100% Renewable Energy Era* (pp. 73-98). Springer, Cham.

(DWD 2018): Deutscher Wetterdienst Stuttgart (2018): aktuelle Wetterdaten von Tübingen Messstation Horemer Botanischer Garten, verfügbar unter <http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/download>, abgerufen am: 20.9.2020.

(DWD 2021): Deutscher Wetterdienst Stuttgart (2021): Mittlere 30-jährige Monats- und Jahressummen der Globalstrahlung, verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_mvs.html?nn=16102, abgerufen am: 20.9.2020.

E

Ekardt, Felix (2011): Theorie der Nachhaltigkeit. Rechtliche, ethische und politische Zugänge - am Beispiel von Klimawandel, Ressourcenknappheit und Welthandel, Nomos Verlag, Baden-Baden.

EMAS (2021): Emas geprüfte Umweltzertifizierung: Top-News- CSR- Lebenswegbetrachtung Lieferkette: Mit EMAS für das Lieferkettengesetz gewappnet? Beitrag am 18.02.2021, verfügbar unter: <https://www.emas.de/aktuelles/news/18-2-2021-lieferkettengesetz>, abgerufen am 25.5.2021.

(Energie Experten, 2020): Solarmodule online kaufen. PV-Modul-Größen im Überblick. verfügbar unter: <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/solarmodule/groesse.html>, erneut abgerufen am 18.1.2020.

(Energie-Lexikon 2021): CO₂-neutral? Grundbegriffe und Definitionen, Ökologie und Umwelttechnik. Ein Online-Nachschlagewerk. Verfügbar unter: https://www.energie-lexikon.info/co2_neutral.html?s=ak , abgerufen am 15.6.2022.

Engel, J. & J. Döllner (2010): Effiziente Verschattungsberechnung für die Solarpotenzialanalyse durch bildbasierte 3D-Analyse. - Geoinformatik 2010, Universität Heidelberg, Tagungsband 2010:64-71. Heidelberg.

Enßle, Fabian (2009): Entwicklung eines ArcGIS Moduls zur Ermittlung von potentiellen Dachflächen zur Erzeugung von solarer Energie basierend auf Laserdaten. Diplomarbeit der Forst- und Umweltwissenschaften, Freiburg.

Esquerra, Alejandro (2008): In Räumen denken-Perspektiven für eine nachhaltige Hochschule, Reflexionen, Studierendeninitiative Greening the University. Rede vom 3.6.2008, Oekom Verlag 2009, München.

ETSOLAR (2020): Solar Modul: Elite High Efficiency Module ET SOLAR. Verfügbar unter: <https://irp.cdn-website.com/316e4722/files/uploaded/ET-M660BH360-380WWWB.pdf> , 2020), abgerufen am 11.8.2020).

(EU ETS 2018): *European Union Emission Trading System*: Ein sauberer Planet für alle. Eine Europäische strategische, langfristige Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft. Mitteilung der

Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss, den Ausschuss der Regionen und die Europäische Investitionsbank: Brüssel, 2018. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0773>, abgerufen am 4.5.2019.

(EU KOM 2018): EU-Maßnahmen: „Die Kommission fordert ein klimaneutrales Europa bis zum Jahr 2050“. Langfristige Strategie – Zeithorizont 2050. Veröffentlichung der europäischen Kommission an.29.11.2018, verfügbar unter: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_de, erneut abgerufen am 11.01.2020.

F

Falke, Horst (1975): Anlegung und Ausdehnung einer geologischen Karte, de Gruyter Lehrbuch, Berlin.

Flachsland, C., Marschinski, R., & Edenhofer, O. (2011): *To link or not to link: benefits and disadvantages of linking cap-and-trade systems*. - *Climate Policy*. 9, Potsdam Institute for Climate Impact Research, S. 358, Berlin. Verfügbar unter: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3763/cpol.2009.0626> , abgerufen am 4.5.2019.

Fichtner, W. (2005). Emissionsrechte, Energie und Produktion: Verknappung der Umweltnutzung und produktionswirtschaftliche Planung (Vol. 61). Erich Schmidt Verlag GmbH & Co KG.

Filho, Walter Leal (1998): Umweltbildung, Umweltkommunikation und Nachhaltigkeit, Band 1: Umweltschutz und Nachhaltigkeit an Hochschulen, Konzepte-Umsetzung. Peter Lang Verlag, S.199, Frankfurt.

Filho, W. L. & B. Delakowitz (2005): Umweltbildung, Umweltkommunikation und Nachhaltigkeit, Band 18: Umweltmanagement an deutschen Hochschulen: Nachhaltigkeitsperspektiven, Peter Lang Verlag, 2005:43-49, Frankfurt.

Filho, W. (Ed.). (2015). Forschung für Nachhaltigkeit an deutschen Hochschulen. Springer-Verlag.

Forster, P., Ramaswamy, P., V. et al.: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge 2007, S. 212, verfügbar unter: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>, abgerufen am 22.4.2017.

(Fritsche 2018a): Fritsche, U.W.; H.-W. Greß (2018): Kumulierter Energie-Verbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommixes für das Jahr 2017 und Ausblicke auf 2020 bis 2050 für HEA (11/2018). IINAS GmbH – Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien Darmstadt, 2018. Verfügbar unter: https://iinas.org/app/downloads_from_old_page/GEMIS/2018_KEV_THG_Strom-2017_2020-2050.pdf , abgerufen am 4.5.2019.

(Fritsche 2018b): Fritsche, U.W.; H.-W. Greß (2018): Kurzstudie: Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2017 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050. Bericht für die HEA - Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V. (11/2018). IINAS GmbH – Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien Darmstadt, 2018. Verfügbar unter: http://iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2018_KEV_THG_Strom-2017_2020-2050.pdf, abgerufen am 4.5.2019.

(FU 2000a): Fu, P. (2000): A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Landscape Ecology, Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA.

(FU 2000b): Fu, P. und P. M. Rich (2000): The Solar Analyst 1.0 Manual, Helios Environmental Modelling Institute (HEMI), Kansas USA.

(FU 2002): Fu, P. und P. M. Rich (2002): "A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Agriculture and Forestry", *Computers and Electronics in Agriculture* 37, S.25–35. Kansas USA.

G

Geigel, J. & Weisser, P. (2016): Zukunftsfähige Hochschulen gestalten. Beispiele des Gelingens aus Lehre, Governance, Betrieb und Forschung. Netzwerk n e.V. c/o Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2016, Berlin.

Geyer, O.F. & Gwinner, M.P. (2011): Geologie von Baden-Württemberg. - 5. Aufl., Hrsg. Geyer, M., Nitsch, E. & T. Simon, 627 S., Schweizerbart, Stuttgart.

Goodchild, M. F. (2018): Reimagining the history of GIS, *Annals of GIS*, Volume 24:1-8, verfügbar unter: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475683.2018.1424737>, abgerufen am 4.5.2019.

Greenpeace (2012): Was Strom wirklich kostet. Vergleich der staatlichen Förderungen und gesamtgesellschaftlichen Kosten von Atom, Kohle und erneuerbaren Energien. Greenpeace Energy eG, 2011, Hamburg.

Greening the University (Hrsg.) (2009): Perspektiven für eine nachhaltige Hochschule, Studierenden Initiative Universität Tübingen, Oekom Verlag 2009.

Großklos, M. (2014): Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und Versorgungen. - Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Veröffentlichungen 2014, Darmstadt. Verfügbar unter: <https://www.delta-q.de/wp-content/uploads/IWU-Neue-Faktoren-2014.pdf>, erneut abgerufen am 15.9.2022.

Günther (2018): Nachhaltigkeit im Hochschulbetrieb. *BMBF-Projekt "Nachhaltigkeit an Hochschulen: entwickeln- vernetzen-berichten (HOCHN)"*, Technische Universität Dresden, Hochschule Zittau/Görlitz (2018). Verfügbar unter: <https://www.hoch-n.uni-hamburg.de/-downloads/handlungsfelder/betrieb/hoch-n-leitfaden-nachhaltiger-hochschulbetrieb.pdf>, abgerufen am: 12.3.2019.

Guyol, N.B. (1971): *Energy in the perspective of geography*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall Inc., New York.

H

Hahn, W. & K. Schädel (1973): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Tübingen und Umgebung 1:50.000, Tübingen. 2 Bll, 66 S. Landesvermessungsamt Stuttgart, 1973.

Hauff, V., & Brundtland, G. H. (1987). *Unsere gemeinsame Zukunft: der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung*. Greven 1987.

Hauff, v. M. (2014a): Nachhaltige Entwicklung. Aus Perspektive verschiedener Disziplinen. Die Reihe „Nachhaltige Entwicklung“, Band 6. Nomos, Baden-Baden.

Hauff, v. M. (2014b): Nachhaltige Entwicklung: Grundlagen und Umsetzung, De Gruyter Oldenburg, 2. Auflage, S. 227. Oldenburg.

(Heizungsfinder 2021): Anlagenkonfiguration Geothermie Praxis Forum: verfügbar unter: <https://www.heizungsfinder.de/waermepumpe/kosten-preise/erdwaerme#:~:text=Kosten%20f%C3%BCr%20Erdw%C3%A4rmesonden%20Pro%20Meter%20Erdsondenbohrung%20-%20Entzugsleistung,mit%20Kosten%20von%20rund%20100%20Euro%20pro%20Bohrmeter>. Abgerufen am 13.10.2020.

Hennes, O., Jeddi, S., Madlener, R. et al. (2021): Auswirkungen von CO₂-Preisen auf den Gebäude-, Verkehrs- und Energiesektor. *Z Energiewirtschaft* 45, 91–107 (2021). Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s12398-021-00305-0>, abgerufen am 23.6.2021.

(HIS 2013): Hochschul-Informationen-System, Darmstadt. verfügbar unter: <https://www.his.de/loesungen/business-intelligence>, abgerufen am 10.10.2020.

Hoch N (2018): HIER AUCH: Bassen, A., Schmitt, C. T., & Stecker, C. (2017). Nachhaltigkeit an Hochschulen: entwickeln- vernetzen-berichten (HOCHN). *uwf UmweltWirtschaftsForum*, 25(1), 139-146. Hamburg.

Hochschild, V., Bunzel, J., Bange, J. & Manton, S.-Ch. (2017): Abschlussbericht 2013-2016 des Kooperationsprojekts „Innovatives Energie- und Umweltkonzept für die Gebäude des Universitätsklinikums und der Universität Tübingen“. Gomaringer Verlag. Tübingen 2017.

(Hochschild 2020): Hochschild, V., Braun, A., Sommer, C., Warth, G., & Omran, A. (2020). Visualizing landscapes by geospatial techniques. In *Modern approaches to the visualization of landscapes* (pp. 47-78). Springer VS, Wiesbaden.

Hochschild et al. (2019): Warth, G., Braun, A., Bödinger, C., Hochschild, V., & Bachofer, F. (2019). DSM-based identification of changes in highly dynamic urban agglomerations. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 322-334. verfügbar unter: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/22797254.2019.1604083>, abgerufen am: 4.5.2019.

Hoffmann, G.; L. Dienes (1985): *European Energy Challenges: East and West*. NC: Duke University Press, Durham.

Hofierka, J., Suri, M. (2002): The solar radiation model for Open-source GIS: implementation and applications. International GRASS users conference in Trento, Italy, September 2002. Verfügbar unter: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-solar-radiation-model-for-Open-source-GIS%3A-and-Hofierka-%C3%BAri/5ae02fcf7ee3e8163eb57b9d3d12d7c76df5d282>, abgerufen am 20.22.2022.

Horner, Mark W. (2013): Towards an integrated GIS Science and energy research Agenda. Department of geography and the institute for energy systems, University of Florida State University.

Hübner, Christian (2013): Emissionshandel-Prinzip und Verantwortung, -Analysen und Argumente, Ausgabe 118, Konrad-Adenauer-Stiftung, Berlin.

Huneke, Fabian (2017): Wirkungsweise einer CO₂-Steuer im Strommarkt. Energie Brainpool GmbH & Co.KG. Eine Studie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V., 2017: 3-35, Berlin.

I

(ICAP 2009): International Carbon Action Partnership (2009): Allokationsplan, Sachverständigenrat für Umweltfragen, Carbon Accounting, Nationales Klimaschutzprogramm. Berlin.

(ICAP 2017): International Carbon Action Partnership (2017): Acworth, W., Ackva, J., Burtraw, D., Edenhofer, O., Fuss, S., Flachland, C., ... & Montes de Oca, M. (2017): Emissions trading and the role of a long run carbon price signal: achieving cost effective emission reductions under an emissions trading system. Berlin: ICAP. verfügbar unter: https://icapcarbonaction.com/system/files/document/icap_long-run-carbon-price-signal.pdf , abgefragt am 4.5.2019.

(ICAP 2018): International Carbon Action Partnership (2018): Allokationsplan, Sachverständigenrat für Umweltfragen, Carbon Accounting, Nationales Klimaschutzprogramm. Berlin.

(ICAP 2019): International Carbon Action Partnership (2019): Emission trading Worldwide, Infographics, status Report 2019, Berlin.

(IC-LEI 2011): International Council for Local Initiatives (2011): Towards urban resilience. Briefing sheet. Verfügbar unter: <https://iclei.org/publication/resilient-cities-thriving-cities-the-evolution-of-urban-resilience/>, erneut abgerufen am 13.9.2022.

(IFEU 2007): Ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2007): Die CO₂-Bilanz des Bürgers, Recherche für eine Internetbasiertes Tool zur Erstellung persönlicher CO₂-Bilanzen. Endbericht i.A. UBA, Heidelberg 2007.

(IINAS 2014): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme GEMIS (2014): Version 4.93 IINAS GmbH-Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien, Darmstadt, 2018. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/29459393-Globales-emissions-modell-integrierter-systeme-gemis.html> , erneut abgerufen am 4.5.2019.

(IINAS 2018): Der nichterneuerbare Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommixes im Jahr 2018 sowie Ausblicke auf 2020 und 2050. Bericht für die HEA - Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V., verfügbar unter: http://iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2018_KEV_THG_Strom-2017_2020-2050.pdf, abgerufen am 2.3.2019.

(IINAS 2020): THG-Emissionen und nichterneuerbarer Primärenergieverbrauch des deutschen Erdgasmix im Jahr 2019 und 2020 sowie Ausblick auf 2030. verfügbar unter: <https://iinas.org/app/uploads/2021/12/IINAS-2021-KEV-THG-Gas-ASEW-final.pdf>, erneut abgerufen am 13.9.2022.

(IPCC 1997): siehe unter: Hauff, v. (1997): der Brundland-Bericht.

(IPCC 2007): Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): Fourth Assessment Report (AR4), Climate Change Synthesis Report Summary for Policymakers, Jahresbericht 2007: 5-22, Geneva, Schweiz. Verfügbar unter: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>, abgerufen am 4.5.2019.

(IPCC 2014): Intergovernmental Panel on Climate Change (2011): Sonderbericht über Erneuerbare Energiequellen und die Minderung des Klimawandels (SRREN) 2011. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle (Hrsg.), DLR-Projekträger, verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/IPCC_SRREN_SPM_Aug2015.pdf, abgerufen am 4.5.2019.

(IPCC 2018): Intergovernmental Panel on Climate Change (2018): Sonderbericht über 1,5 °C globale Erwärmung (SR1.5) 2018, Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger: Hauptaussagen des Sonderberichts. Deutsche

IPCC-Koordinierungsstelle (HRSG.), DLR-Projektträger, verfügbar unter: <https://www.de-ipcc.de/256.php>, abgerufen am 4.5.2019.

(IPCC 2019): Intergovernmental Panel on Climate Change (2019): Interviews with authors of 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines on National Greenhouse Gas Inventories. Verfügbar unter: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/04/190427-MA-p49-interviews.pdf>, abgerufen am 4.5.2019.

(ISE 2021): Institut für Solare Energiesysteme: Fraunhofer Klimaneutral 2030. Entwicklung, Anwendung und Demonstration ganzheitlicher Lösungen für klimafreundliche Organisation und Liegenschaften – Fraunhofer als Vorbild für Verwaltung und Wissenschaft. Verfügbar unter: https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/ueber-fraunhofer/wissenschaftspolitik/Positionen/politikpapiere-btw21/Politik-Papier_Klimaneutral%202030%20WEB.pdf, abgerufen am 18.06.2022.

J

Jährlich, Kristina (2016): CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. IN: Climate Change 27/2016. Für Mensch und Umwelt, i.A. Umweltbundesamt, Fachgebiet Emissionssituation (I2.6), Dessau-Roßlau.

Janßen (2018): Janßen, H., & Schäfer, T. (2018). Storytelling: Abholen, reinziehen, interessieren, fesseln, begeistern, anregen. Netzwerke Weitblick e.V., Berlin. Verfügbar unter: <https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/23154>, abgerufen am 12.10.2019.

Jörissen, J., & Karlsruhe, F. (1999). *Ein integratives Konzept nachhaltiger Entwicklung* (Vol. 6393). FZKA.

K

Kahl, H. & L. Simmel (2017): Europa- und verfassungsrechtliche Spielräume einer CO₂-Bpreisung in Deutschland, Stiftung Umweltenergiebericht. Würzburger Studien zum Umweltenergiebericht. Würzburg.

Kanaeva, Z., Hochschild, V., Märker, M., & Sommer, C. Digital Data and Tools in Archaeology: The ROCEEH Out of Africa Database (ROAD). *GI_Forum 2018*, 6, 3-12.

Kemper, A.; A. Eickler (2009): Datenbanksysteme - Eine Einführung, 7. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, S. 672, München.

(Klärle 2007): Klärle, M. et al. (2007): Geoprozessing in Erneuerbaren Energien, - Geoinformatik 2010, Universität Heidelberg, Tagungsband 2010:226-234, Heidelberg.

(Klärle 2012): Klärle, M. et al. (2012): Erneuerbare Energien unterstützt durch GIS und Landmanagement. Wichmann, Wichmann Verlag, S.428, Wiesbaden.

(Klärle 2019): Klärle, M., & Langendörfer, U. (2019). Entwicklung von Plusenergie-Siedlungen. In *Aktuelle Ansätze zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele* (pp. 167-185). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.

Knoch, A. (2017): A Context-based Groundwater Data Infrastructure, Thesis, University of Tartu, Figure 2: GIScience, as an holistic connecting discipline lays claim to the central cross section. Tartu 2017.

Knight, G. (2010): Climate Change: The Health of a Planet in Peril. Annals of The Association of American Geographers 100. Gregory Knight, Department of Geography, The Pennsylvania State University, London. verfügbar unter: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00045608.2010.502444>, erneut abgerufen am 4.5.2019.

Kraftwerker (2021): Graphik: Thermographie am Altbau / Haus-Skala. Graphik verfügbar unter: https://www.die-kraftwerker.de/media/img/content/haus_skala.jpg, abgerufen am 21.10.2021.

Krämer, M. R.; Klein, E.; Kohlhammer, J. (2012): DeepCity3D: Integration von 3D Stadtmodellen und Untergrundinformationen. - Multidisciplinary Research on Geographical Information in Europe and Beyond. Internationale Conference on Geographic Information Science, 2012:72-79, Avignon.

Kuby, M. (1995); Investment Strategies for Chinas Coal and Electricity Delivery System. Report NO. 12687-CHA, DC: World Bank, Washington.

Kühne, O. (2018a): Kühne, O., & Weber, F. (Eds.). (2018). *Bausteine der Energiewende*. Wiesbaden: Springer VS.

Kühne, O. (2018b). ‚Neue Landschaftskonflikte ‘–Überlegungen zu den physischen Manifestationen der Energiewende auf der Grundlage der Konflikttheorie Ralf Dahrendorfs. In Bausteine der Energiewende (pp. 163-186). Springer VS, Wiesbaden.

Kühne, O. (2019): Kühne, O., Weber, F., Berr, K., & Jenal, C. (Eds.). (2019). *Handbuch Landschaft*. Springer-Verlag.

Kühne, O. (2021): Kühne, O., Berr, K., Jenal, C., & Schuster, K. (2021). Aktuelle gesellschaftliche und raumbezogene Entwicklungen. In *Freiheit und Landschaft* (pp. 59-121). Springer VS, Wiesbaden.

Kurz, R. (1998). Nachhaltigkeit und Ökobilanz als Grundlage für Umweltschutzmaßnahmen. Leal Filho, W. (Hrsg.) (1998). *Umweltbildung, Umweltkommunikation und Nachhaltigkeit*, Bd. 1, 129-142.

L

Lang, S., Füreder, P., Riedler, B., Wendt, L., Braun, A., Tiede, D., ... & Hochschild, V. (2020). Earth observation tools and services to increase the effectiveness of humanitarian assistance. *European Journal of Remote Sensing*, 53(sup2), 67-85.

Lauf, T., Memmler, M., & Schneider, S. (2019). Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. *Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau*. 2019.

(LGRB 2013): Landesanstalt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) (2013): Geologische Bohrprofile des ISONG-Serverzugang: Erläuterungen zum Informationssystem Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg (ISONG) - erweiterte Version. verfügbar unter: http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/Service/download/download_uebersicht, abgerufen mit kostenpflichtigem Login (tba-Lizenz, Zeitraum 2010-2013).

Lichtmeß, M. (2010): Vereinfachungen für die energetische Bewertung von Gebäuden. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal.

Löschel, A. et al. (2021): Wie fair ist die Energiewende? Verteilungswirkungen in der deutschen Energie- und Klimapolitik? ifo Institute - Leibniz Institute for Economic Research at the University of Munich, vol. 74(06), pages 03-33, June 2021. Verfügbar unter: <https://www.ifo.de/publikationen/2021/aufsatz-zeitschrift/wie-fair-ist-die-energiewende-verteilungswirkungen-der>, abgerufen am 23.6.2021.

(LRA TÜ 2022): Landratsamt Tübingen (2022): Zulässigkeit von Erdwärmesonden im Landkreis Tübingen, Abteilung Umwelt und Gewerbe, verfügbar unter: https://www.kreis-tuebingen.de/site/LRA-Tuebingen-Internet-Root/get/params_E1996038460/11742679/Zul%C3%A4ssigkeit%20Erdw%C3%A4rmesonden.pdf, erneut abgerufen am 5.1.2022.

Lübbert, D. (2007). CO₂-Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich. Deutscher Bundestag.

(LUBW 2022a): Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg 2022): Wasserschutz- und Quellschutzgebiete in Tübingen. Manuelle Abfrage über Daten- und Kartendienst LUBW. Verfügbar unter: <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/pages/map/default/index.xhtml?>, erneut abgerufen am 5.1.2022.

(LUBW 2022b): Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg 2022: Energieatlas Baden-Württemberg. Verfügbar unter: <https://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflachen/solarpotenzial-auf-dachflachen>, abgerufen am 5.1.2022.

(LUBW 2022c): Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg 2022: Solarkataster Baden-Württemberg. Verfügbar unter: <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/blog/-/blogs/das-neue-solardachkataster-ist-online>, abgerufen am 10.9.2022.

Lützkendorf, Th. et al (2014): How does sustainable use and operation of public buildings in Germany work? World Sustainable Building Conference SB14, Proceedings, Barcelona, 28.-30.10.2014, ISBN: 978-84-697-1815-5, KITopen-ID: 1000079698. *Ökonomie und Ökologie des Wohnungsbaus (OEWS)* sm Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2014.

M

Madlberger, M. (2022). State of the Art of Smart Services Research—Applications and Customer Acceptance. *Smart Services*, 139-165. In: Bruhn, M., & Hadwich, K. (2022). *Smart Services im Dienstleistungsmanagement— Erscheinungsformen, Gestaltungsoptionen und Innovationspotenziale*. In *Smart Services* (pp. 3-60). Springer Gabler, Wiesbaden.

Manners, G. (1964): *The Geography of Energy*, Hutchinson University Library, London.

(Manton 2012): Manton, S. C., Bunzel, J., Hager, K., Lehmann, S., Stängel, M., & Hochschild, V. (2012). Energie- und Ressourcenmanagement an Universitäts- und Klinikumsstandorten mit Hilfe von GIS. *Standort*, 36(3), Zeitschrift für Angewandte Geographie, Springer Spektrum Verlag 132-138. Heidelberg.

(Manton 2016): Manton, S. C., Potthast, T., & Hochschild, V. (2016). Nachhaltiges Campusmanagement im Bereich Energie—Der Transformationsprozess in öffentlichen Einrichtungen am Beispiel eines Kooperations-projekts an der Universität Tübingen. In *Forschung für Nachhaltigkeit an deutschen Hochschulen* (pp. 395-411). Springer Spektrum, Wiesbaden.

(Manton 2017) Manton, S. C. (2017). Ableitung von Indikatoren für ein nachhaltiges Campuskonzept im Bereich Energie- und Gebäudebewertung mithilfe geographischer Informationssysteme: Ermittlung des nutzbaren regenerativen Energiepotenzials am Beispiel des Gebäudebestandes der Eberhard-Karls-Universität Tübingen.

(Manton 2018) Manton, S-Ch. (2018): Entwicklung eines GIS-gestützten Bewertungstools zur Unterstützung nachhaltiger Campuskonzepte, Ermittlung des nutzbaren regenerativen Energiepotenzials mittels geographischer Informationssysteme (GIS) am Beispiel des Gebäudebestandes der Eberhardt-Karls-Universität Tübingen. - Droege, P. & J. Knieling (Hrsg.) (2018): *Regenerative Räume: Leitbilder und Praktiken nachhaltiger Raumentwicklung*, Oekom Verlag, S. 298, München.

Massimo, D. E., Del Giudice, V., Musolino, M., De Paola, P., & Del Giudice, F. P. (2022). Green Building to Overcome Climate Change: The Support of Energy Simulation Programs in Gis Environment. In *INTERNATIONAL SYMPOSIUM: New Metropolitan Perspectives* (pp. 725-734). Springer, Cham.

Matthias, E. (2014): *3D-Modellierung in der Stadtvermessung Hamburg*. - Business Geomatics, Technologieführer 3D-City und Gebäudemodelle, 2014/1, sig Media GmbH & Co. KG, Köln.

Meadows, D. (1972): *Die Grenzen des Wachstums*. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit Taschenbuch – 1972 Wachstums, dva informativ, S.183, München.

Mei, S. (2008): *Digital Mapping and 3D Visualization/Modelling of Subsurface Geology Using ArcGIS 9.2. and Well Log Data*. Energy Resources Conservation Board, ERC/AGS Information Series, BD. 136. Edmonton.

Meisch, S. et al (2015): *Indicator-based Analysis of the process towards a university in sustainable development: a case study of the University of Tübingen (Germany)*. - World Sustainability Series, Book Series, Vol.27: 169-183, Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-10690-8_12, erneut abgerufen am 4.5.2019.

(MF BW 2008) Ministerium für Wirtschaft und Finanzen, Baden-Württemberg (2008): *Impulsprogramm Klimaschutz – 2008-2009*, Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg, Finanzministerium Baden-Württemberg, Stuttgart. Stuttgart.

(MF BW 2009a) Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.) (2009): *Energiekonzept 2020*, Baden-Württemberg, Stuttgart.

(MF BW 2009b) Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2009): *Stärkung der Nachhaltigkeit im Staatlichen Hochbau*. Strategien, Ziele und Handlungsleitlinien. Informationen zur Nachhaltigkeitsstrategie Baden-Württemberg, Stuttgart.

(MF BW 2010) Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2010): *Impulsprogramm (2010-2012)*, Beschluss vom 11.12.2012, Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg, Finanzministerium Baden-Württemberg, Stuttgart.

(MF BW 2012a) Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2008): *Konzept zur energetischen Sanierung und zum Einsatz erneuerbarer Energien bei landeseigenen Liegenschaften*. Strategie und Handlungsleitlinien, übergeben durch Thorsten Wenisch, Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung, Stuttgart.

(MF BW 2012b) Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2012): *Konjunkturprogramme im städtlichen Hochbau 2009-2001*, staatliche Vermögens- und Hochbau-verwaltung Baden-Württemberg, Stuttgart.

- (MF BW 2013a) Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2013): Energiebericht 2013, Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg, Stuttgart.
- (MF BW 2013b) Ministerium für Finanzen Baden-Württemberg (2013): Betriebsanweisung Energie, Vermögen und HochbauVwV, S: 51, Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg, Stuttgart. verfügbar unter: https://www.vbv-bw.de/fileadmin/VBV-Portal/Service/Fachinformationen/Betriebsanweisung_Energie/Betriebsanweisung_Energie.pdf , abgerufen am 5.5.2019.
- (MF BW 2015a) Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2015): Energie- und Klimaschutzkonzept 2015, Energie- und Klimaschutzkonzept für landeseigene Liegenschaften Umsetzungsstand, Stuttgart.
- (MF BW 2015b): Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2015): Energiebericht 2015, Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg, Stuttgart.
- (MF BW 2017): Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2017): Energiebericht 2017, Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg, Stuttgart.
- (MF BW 2020a): Ministerium für Finanzen Baden-Württemberg (2020): 18. Februar: Energie- und Klimaschutzkonzept für landeseigene Liegenschaften 2020 bis 2050. Zusammenfassung, Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg, Stuttgart.
- (MF BW 2020b): Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2020): Energiebericht 2020, Energie- und Klimaschutzkonzept 2020-2050. Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg, Stuttgart.
- (MF BW 2021a): Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2021): Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg -Verabschiedung der 1. Novelle des Klimaschutzgesetzes durch den Landtag Baden-Württemberg am 6. Oktober 2021. Entschließungsantrag des Landtags zum Energie- und Klimaschutzkonzept für Landesliegenschaften. 17.Nov.2021 an die Staatlichen Vermögens- und Hochbauverwaltungen Baden-Württembergs, Stuttgart.
- (MF BW 2021b): Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2021): Verordnung des Umweltministeriums zu den Pflichten zur Installation von Photovoltaikanlagen auf Dach- und Parkplatzflächen (Photovoltaik-Pflicht-Verordnung – PVPf-VO) vom 11. Oktober 2021 an die Staatlichen Vermögens- und Hochbauverwaltungen Baden-Württembergs, Stuttgart.
- (MF BW 2021c): Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (2021): Klimaschutzpolitik und Klimaschutzziele - Anforderungen an Landesliegenschaften - Projektmanagement-Gespräche 2021, Ministerium für Finanzen Abteilung Vermögen und Hochbau. Stuttgart.
- Milkoreit, M. (2016): The Promise of Climate Fiction - Imagination, Storytelling and the Politics of the Future. In Wapner, Paul and Hilal Elver (eds.) Reimagining Climate Change. Routledge Publishing. Verfügbar unter: <https://www.resalliance.org/publications/1671>.
- Moulaert, F., MacCallum D., Mehmood, A., Hamdouch, A. (2014): Social Innovation in an unsustainable World. -The International Handbook on Social Innovation. Collective Action, Social Learning and Transdisciplinary Research. Inc. S. 53-69. Northampton, USA.
- (MUK BW 2004) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2004): Geothermie-Energie für die Zukunft, Stuttgart.
- (MUK BW 2008/1) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2008) (Hrsg.): Thermische Nutzung von Grundwasser durch Wärmepumpen-Prinzipstudie zur Berechnung von Temperaturfeldern für kleine Anlagen mit Energieentzug kleiner 45.000 kWh/Jahr für charakteristische Situationen in Baden-Württemberg. Auftrag an Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH. Stuttgart.
- (MUK BW 2008/2) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.): Arbeitshilfe um Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen für Ein- und Zweifamilienhäuser oder Anlagen mit Energieentzug bis zirka 45.000 kWh pro Jahr, Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH, Stuttgart.
- (MUK BW 2009/1) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.) (2009): Informationen zur Nachhaltigkeitsstrategie: „Stärkung der Nachhaltigkeit im Staatlichen Hochbau“, jetzt das Morgen gestalten, Nachhaltigkeitsstrategie Baden-Württembergs, Ziele, Strategien und Handlungsleitlinien, Geschäftsstelle Nachhaltigkeitsstrategie, Stuttgart.

- (MUK BW 2009/2) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.) (2009): Qualitätsmanagement, Fehlervermeidung bei Wärmepumpen- und Erdsonden- Heizsystemen, Stuttgart.
- (MUK BW 2009/3) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.): (2009): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmekollektoren, 1. Auflage, Stuttgart.
- (MUK BW 2010) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.): (2010): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, 5. überarbeitete Auflage, Stuttgart.
- (MUK BW 2015) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2015): EEWärmeG 2015. Das Erneuerbare-Wärme-Gesetz für bestehende Wohngebäude und Nicht-wohngebäude, Stuttgart.
- (MUK BW 2016) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2016): Integriertes Energie -und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg, 2016, Stuttgart.
- (MUK BW 2017a) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2017): Monitoring-Bericht zum Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg, Teil I Klimafragen und Anpassung, Stuttgart.
- (MUK BW 2017b) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2017): Monitoring-Bericht zum Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg, Teil II Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept, Stuttgart.
- (MUK BW 2017c) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2017): Monitoring der Energiewende im Baden-Württemberg, Statusbericht 2018, Stuttgart.
- (MUK BW 2018) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2018): Geothermie und Wasserstoff im Fokus. Einblicke 2018 Journal zur Umweltforschung in Baden-Württemberg, Stuttgart.
- (MUK BW 2018a) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2018): MUK 2018, Pressemitteilung der FDP_Fraktion 16.8.2018), dpa.
- (MUK BW 2021a): Pressemitteilung zum Klimaschutz-Plus- Förderprogramm. verfügbar unter: <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/foerderprogramm-klimaschutz-plus-wird-fortgefuehrt/>, abgerufen am 18.5.2021.
- (MUK BW 2021b): Klimaneutrale Landesverwaltung. Novelle Oktober 2021: verfügbar unter: <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/ministerium/aufgaben-und-organisation/nachhaltige-landesverwaltung/klimaneutrale-landesverwaltung/>, abgerufen am 18.06.2022.
- (MUK BW 2021c): Verordnung des Umweltministeriums zu den Pflichten zur Installation von Photovoltaikanlagen auf Dach- und Parkplatzflächen (Photovoltaik-Pflicht-Verordnung – PVPf-VO) vom 11. Oktober 2021: verfügbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4_Klima/Klimaschutz/Klimaschutzgesetz/Photovoltaikpflicht-Verordnung-Baden-Wuerttemberg-barrierefrei.pdf , abgerufen am 18.06.2022.
- Müller-Christ, G. (2014): Nachhaltiges Management, Einführung in Ressourcenorientierung und widersprüchliche Management-Rationalitäten, 2. Auflage, Nomos Verlagsgesellschaft Baden-Baden.
- (Myclimate 2020): Pressemitteilung: myclimate Deutschland gGmbH ermöglicht erstmalig CO2-Kompensation über deutsches Klimaschutzprojekt. Verfügbar unter: https://de.myclimate.org/fileadmin/user_upload_de/myclimate_home_DE/01_Information_DE/02_News_Press_DE/Presse_DE/PR_2020/200312_PR_myclimate_bietet_deutsches_Klimaschutzprojekt.pdf , abgerufen am 12.12.2021.
- (Myclimate 2021): myclimate Deutschland gGmbH: die myclimate Label-Richtlinien: verfügbar unter: https://de.myclimate.org/fileadmin/user_upload_de/myclimate_home_DE/01_Information_DE/01_About_myclimate_DE/10_Downloads/myclimate_Deutschland_Label_Guidelines_DE_01.2021_01.pdf , abgerufen am 21.06.2022.

N

Nachmany, M. et al. (2016): *The GLOBE Climate Legislation Study - A Review of Climate Change Legislation in 66 Countries* (Hrsg.): GLOBE International and the Grantham Research Institute, London School of Economics. 2014, Kapitel 4.30, Japan. Verfügbar unter: <http://www.globeinternational.org/studies/legislation/climate>, abgerufen am 24.4.2016.

NASHWAN, A. N.; AL-JOBURI, K. (2021): A Prototype to Produce an Integrated GIS-SUE Map. In: *2021 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)*. IEEE, 2021. S. 592-597.

(Netzwerk n e.V. 2016): Zukunftsfähige Hochschulen gestalten: Beispiel des *Gelingens aus Lehre, Governance, Betrieb und Forschung*. (netzwerk n e.V. 2016). Verfügbar unter: https://www.fona.de/medien/pdf/Zukunftsfahige_Hochschulen_Gestalten_netzwerk_n_VA_online.pdf, erneut abgerufen am 20.22.2022.

(Nölting 2018): Nölting, B., Dembski, N., Pape, J., & Schmuck, P. (2018): Wie bildet man Change Agents aus? Lehr-Lern-Konzepte und Erfahrungen am Beispiel des berufsbegleitenden Masterstudiengangs „Strategisches Nachhaltigkeitsmanagement“ an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde. In *Nachhaltigkeit in der Lehre* (pp. 89-106). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.

Newman, P. (2010): Resilient infrastructure cities. In *Developing living cities: From analysis to action* (pp. 77-106). World Scientific. Verfügbar unter: [https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=ALTFCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA77&dq=Newman,+P.+\(2010\):+Resilient+infrastructure+cities&ots=Y5E8LS3Vx-&sig=i3PnlKW12r4mHRoiaGgJjR6a9vk#v=onepage&q=Newman%2C%20P.%20\(2010\)%3A%20Resilient%20infrastructure%20cities&f=false](https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=ALTFCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA77&dq=Newman,+P.+(2010):+Resilient+infrastructure+cities&ots=Y5E8LS3Vx-&sig=i3PnlKW12r4mHRoiaGgJjR6a9vk#v=onepage&q=Newman%2C%20P.%20(2010)%3A%20Resilient%20infrastructure%20cities&f=false), erneut abgerufen am: 18.9.2022.

Nye, D. E. (1990). *Electrifying America: Social Meaning of a New Technology*. Cambridge.

Nye, D. E. (1999). *Consuming power: A social history of American energies*. MIT Press. Amherst: University of Massachusetts Press.

O

Odell, P. R. (1986): *Oil and World Power*. Routledge Rivivals (2013), 8th revised ed. Harmondsworth, Penguin Book, ebooks, United Kingdom. Verfügbar unter: <https://www.bol.com/nl/p/oil-and-world-power/920000021180527/>. Abgerufen am 4.5.2019.

Oehler, St. (2018): Emissionsfreie Gebäude. Das Konzept der „Ganzheitlichen Sanierung“ für die Gebäude der Zukunft, Springer Fachmedien Vieweg, S. 348, Wiesbaden.

Oke, T. R. (1988). *Boundary layer climates*. London and New York: Methuen & Co., Ltd. and Methuen.

Öko-Institut (2018): Infographiken: verfügbar unter: <https://www.flickr.com/photos/oekoinstitut/collections/72157632006732072/>. Abgerufen am 4.5.2019.

ÖKO-Institut (2019): Infographiken, verfügbar unter: <https://www.flickr.com/photos/oekoinstitut/collections/72157632006732072/>, abgerufen am 4.5.2019.

Ottmann, M., St. F. Lifka (2010): *Methoden der Standortanalyse*, Geowissen Kompakt, WBG Akademie Verlag, 1. Auflage, S.133, Darmstadt.

Omran, A., Fahmida, K., Schröder, D., Arnous, M. O., El-Rayes, A. E., & Hochschild, V. (2021). GIS-based rockfall hazard zones modeling along the coastal Gulf of Aqaba Region, Egypt. *Earth Science Informatics*, 14(2), 691-709.

P

Pasqualetti, M. J. (2011): *The Geography of Energie and the Wealth of the World*. Book Review Essay, School of Geographical Sciences and Urban Planning, Arizona State University USA, pages 270- 279).

Pasqualetti, M. J. (2013). The geography of energy and the wealth of the world. In *The New Geographies of Energy* (pp. 282-291). Routledge.

Peter, St. (2013): Modellierung einer vollständig auf erneuerbare Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Strukturen. i.A. des Umweltbundesamt (UBA), Energiestrategien und -Szenarien. Dessau-Roßlau.

(Photovoltaik 2018): Wissen zur Planung & Realisierung einer PV-Anlage. Verfügbar unter: <https://www.photovoltaik.org/wissen/photovoltaik-wirkungsgrad>: 2018), abgerufen am 12.12.2021.

(Photovoltaik 2021): EEG-Einspeisevergütung nach EEG 2017. verfügbar unter: <https://www.photovoltaik4all.de/aktuelle-eeg-verguetungssaetze-fuer-photovoltaikanlagen-2017>, abgerufen am 10.12.2021

Polanyi, K. (1973): *The Great Transformation, The political and Economic Origins of our Time*, foreword by J.E. Stiglitz, Beacon Press, S. 315, Boston.

Potthast, Th., S. Meisch (2012): *Climate Change and Sustainable Development: Ethical Perspectives on Land Use and Food Production: EurSAFE 2012*, Wageningen Academic Publishers, Niederlande.

Schopp, K., Bornemann, M., & Potthast, T. (2020): The whole-institution approach at the University of Tübingen: Sustainable development set in practice. *Sustainability*, 12(3), 861.

Potthast, T. (2021a): Geosciences and Geoethics in Transition: Research Perspectives from Ethics and Philosophy of Science—A Commentary. *Geo-societal Narratives*, 213-216.

Potthast, T. (2021b): Gemeinsame Werte!? Warum sich Klimaschutz und Naturschutz nur scheinbar gegenüber stehen. Verfügbar unter: https://lnv-bw.de/wp-content/uploads/2021/11/2021-11-13-Potthast_LNVKlimaBiodiv.pdf, abgerufen am 12.9.2022.

Potter, H. C. (1977) *Man, Energy, Society*. San Francisco and Reading (WH Freeman & Co.), 1976. xiv+ 478 pp., 113 figs. *Mineralogical Magazine*, 41(319), 423-424. San Francisco 1977.

Prasad, N., F. Ranghiere, F. Sh. (2009): *Climate resilient cities: A primer reducing vulnerabilities to disaster - Report NO. 12687-CHA*, Washington, World Bank, New York.

Pratt. W. E. and D. Good (1950): *World Geography of Petroleum*, In: American Geographical Society Special Publication No.31. (1951) Princeton, Princeton University Press, New York.

Q

(Quaschnig 1998): Quaschnig, V. & Hanitsch, R. (1998): Höhere Flächenausbeute durch Optimierung bei aufgeständerten Modulen: 13. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein. Verfügbar unter: https://www.volker-quaschnig.de/downloads/staffelstein1998_1.pdf, erneut abgerufen am 4.5.2019.

(Quaschnig 2009): Quaschnig, Volker (2009): *Erneuerbare Energien und Klimaschutz: Hintergründe - Techniken - Anlagenplanung – Wirtschaftlichkeit*. Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, S. 354, München.

(Quaschnig 2015): Quaschnig, Volker (2015): *Regenerative Energiesysteme. Technologie, Berechnung Simulation*, Carl Hanser Verlag, 9. Auflage, S.444, München.

(Quaschnig 2020): Quaschnig, Volker (2020): wissenschaftliche Statistiken. verfügbar unter: <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/index.php>, abgerufen am: 3.3.2021.

(Quaschnig 2021): Quaschnig, V. (2021). *Erneuerbare Energien und Klimaschutz: Hintergründe–Techniken und Planung–Ökonomie und Ökologie–Energiewende*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. München.

Quénéhervé, G., Tischler, J., & Hochschild, V. (2018). Energiewende im Quartier–Ein Ansatz im Reallabor. In *Bausteine der Energiewende* (pp. 385-405). Springer VS, Wiesbaden.

Quénéhervé, G. (2018): Mehrfachnutzung von Flächen–solare Energie-produktion im Quartier. Verfügbar unter: https://gispoint.de/fileadmin/user_upload/paper_gis_open/AGIT_2018/537647014.pdf, abgerufen am 12.9.2022.

R

Radetzky, M. (1994): *Energy and Economic Reform in The Former Soviet Union: Implications for Production, Consumption and Exports*. Palgrave Macmillan. New York.

Raghoo, P., Surroop, D., Wolf, F., Leal Filho, W., Jeetah, P., & Delakowitz, B. (2018). Dimensions of energy security in small island developing states. *Utilities Policy*, 53, 94-101.

Ranson, M., & Stavins, R., 2013: *Linkage of Greenhouse Gas Emissions Trading Systems - Learning from Experience*. Discussion Paper Resources For The Future, No. 42. S.

Renn, Ortwin, J. Deuschle, A. Jäger, W., Weimer-Jehle (Hrsg.) (2007): Leitbild Nachhaltigkeit. Eine normativ-funktionale Konzeption und ihre Umsetzung. Indikatoren und Nachhaltigkeit, Band 5, Wiesbaden.

Repenning, J. et al (2019): Folgenabschätzung zu den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgewirkungen der Sektorziele für 2030 des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung. Endbericht, Öko-Institut e.V. Institut für angewandte Ökologie, Berlin.

(RfNE: 2015): Rat für Nachhaltige Entwicklung (2015): Deutscher Nachhaltigkeitskodex. Maßstab für nachhaltiges Wirtschaften. c/o Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) mbH, 2015 Berlin.

(RfNE: 2021): Rat für Nachhaltige Entwicklung (2015): Deutscher Nachhaltigkeitskodex. DNK-Meldung: Gastbeitrag von Dr. Janine v. Wolfersdorff: Das deutsche Lieferkettengesetz – und sein Abbild in der Rechnungslegung der Firmen. 2021 Berlin verfügbar unter: <https://www.deutscher-nachhaltigkeitskodex.de/de-DE/Home/News/Sustainability-Code/2021/DNK-Gastbeitrag-JvW>, abgerufen am 27.7.2021.

Rich, P. M., R. Dubayah, W. A. Hetrick und S. C. Saving (1994): "Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology", American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers, S. 524–529. New York.

Rich, P. M. und P. Fu (2000): Topoclimatic Habitat Models, Proceedings of the Fourth International Conference on Integrating GIS and Environmental Modelling. Renewable Powered. New York: Elsevier Science.

Richter, W., W. Lillich (1975): Abriss der Hydrologie, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, S. 281, Stuttgart.

Roth, M., Röhner, S., Tilk, C., & Hildebrandt, S. (2018): Bundesweite GIS-basierte Landschaftsbildbewertung als Beitrag zur Umweltprüfung im Zuge des Stromnetzausbaus.

Roth, M., Hildebrandt, S., Roser, F., Schwarz-von Raumer Hans-Georg, Borsdorff, M., Peters, W., ... & Bruns, E. (2021). *Entwicklung eines Bewertungsmodells zum Landschaftsbild beim Stromnetzausbau*. Bundesamt für Naturschutz.

Roux, v., Y. (2020). GIS-Tools im Geographieunterricht. Entwicklung und Evaluation von GIS-Bildungsangeboten für Studierende und Geographielehrkräfte. *und Lehrerbildung im Fach Geographie im Fokus von Theorie, Empirie und Praxis*, 207. HGS-Symposium 2018. Münster.

S

Sass, Ingo (2009): Artesische Grundwasser und Karsterscheinungen im Konflikt mit Erdwärmesonden: Überlegungen zur Schadensursache im Fall Staufen Breisgau, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Angewandte Geothermie, Technische Hochschule, Darmstadt. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/31010871-Artesisches-grundwasser-anhydrit-und-karsterscheinungen-im-konflikt-mit-erdwaermesonden-ueberlegungen-zur-schadensursache-im-fall-staufen-im-breisgau.html>, erneut abgerufen am 5.5.2019.

SARAVANAVEL, J., et al. GIS based 3D visualization of subsurface geology and mapping of probable hydrocarbon locales, part of Cauvery Basin, India. *Journal of Earth System Science*, 2020, 129. Jg., Nr. 1, S. 1-12.

Schulze, U., & Gryl, I. (2022). Geographische Bildung in der digitalen Welt. *Fachliche Bildung in der digitalen Welt: Digitalisierung, Big Data und KI im Forschungsfokus von 15 Fachdidaktiken. Allgemeine Fachdidaktik Band 3*, 143. Waxmann Verlag, Münster.

Schwencke, T., & Bantle, C. (2019): BDEW Strompreisanalyse Januar 2019-Haushalte und Industrie. In: BDEW-Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 1, 1-48, Berlin 2019.

Sierig, J. (2018): Kostenvoranschläge für unterschiedliche Anlagengrößen für Photovoltaik und Geothermie, Firma RUOFF, Reutlingen. 2018.

Smil, V. (2000): Energy in the twentieth century: resources, conversions, costs, uses, and consequences. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), 21-51.

Smil, V. (2013). American energy debates have suffered from a surfeit of shallow generalities, from uncritical. *The New Geographies of Energy: Assessment and Analysis of Critical Landscapes*, 11. Routledge Verlage, S. 296, Cambridge.

Simonetti, S., Currà, A., Minniti, S., & Modafferi, M. (2022). GIS Roads Cadastre, Infrastructure Management and Maintenance. In *INTERNATIONAL SYMPOSIUM: New Metropolitan Perspectives* (pp. 2045-2053). Springer, Cham.

Sneep e.V. (2018): Positions- und Forderungspapier: Nachhaltigkeit und Ethik an Hochschulen. Initiative für Nachhaltigkeit und Ethik an Hochschulen. -Sneep e.V., Weitblick e.V., Netzwerk n e.V., Was bildet ihr uns ein? e.V. (Hrsg.), 2. Auflage, S. 58. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-56314-4_6 , erneut abgerufen am 5.5.2019.

Sommer, Christian (2015): Interner Projektbericht, Erstellung eines Logbooks für die Solarpotenzialanalyse: siehe auch MANTON et al (2012). Universität Tübingen 2012.

Sommer, Christian (2021): Reconstruction of the Pleistocene Landscape of Southern KwaZulu-Natal, South Africa., Dissertation at University of Tübingen.

(SRU 2022): Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU, 2022): Wie viel CO₂ darf Deutschland maximal noch ausstoßen? Umweltrat aktualisiert CO₂-Budget, Berlin. Pressemitteilung vom 15.6.2022. verfügbar unter: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2022_06_fragen_und_antw_orten_zum_co2_budget.pdf?__blob=publicationFile&v=15 , abgerufen am 22.6.2022.

(STABA 2018): Statistisches Bundesamt 2018: Zahlen zur Energieerzeugung und Energieverbrauch, verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=find&levelindex=0&levelid=1668964569076&option=table&query=energieerzeugung#abreadcrumb> , erneut abgerufen am 13.9.2022.

(STABA 2022): Statistisches Bundesamt 2018: Zahlen zu Abfrage 2021 Energieerzeugung. Wiesbaden, 2018.

Stadtwerke Tübingen swt (2021): CO₂-Äquivalente für Fernwärme aus Holzhackschnitzel in Tübingen. Stadtwerke Tübingen, Fernwärmenetz WHO, swt. Verfügbar unter: <https://www.swtue.de/energie/fernwaerme/vorteile.html> , abgerufen Juli 2021.

Staehele, W. H. (1994): Management- eine verhaltenswissenschaftliche Perspektive. Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. 7. Aufl., Verlage Vahlen, München.

(Statista 2021): Statista GmbH: verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1202724/umfrage/heizkosten-eines-haushalts-fuer-gas-und-heizoel-in-deutschland/> abgerufen am 21.11.2021.

Steierwald, M., & Weimer-Jehle, W. (2018): Aspekte der Qualität. In Bausteine der Energiewende (pp. 447-468). Springer VS, Wiesbaden. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-19509-0_22 , abgerufen am 18.9.2022.

Stilla, U., & Hoegner, L. (2007). Automatische Auswertung von Wärmebildsequenzen zur Texturierung von 3D Gebäudemodellen. *DVW Bayern Mitteilungen*, 59(1), 51-62. München.

Stober, Ingrid. (2007): Wärme ist unter uns. Geothermie in Baden-Württemberg. i.A. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), Referat 42- Erneuerbare Energien und rationale Energieanwendung, Stuttgart.

Stratmann, Fr. (1998): Hochschul-Informationssystem Hannover. – Filho, W. L. (1998): Umweltbildung, Umweltkommunikation und Nachhaltigkeit, Band 1: Umweltschutz und Nachhaltigkeit an Hochschulen, Konzepte-Umsetzung. Peter Lang Verlag, S.199, Frankfurt.

Sturm, C., & Mattissek, A. (2018). Energiewende als Herausforderung für die Stadtentwicklungspolitik–eine diskurs- und gouvernementalitätstheoretische Perspektive. In Bausteine der Energiewende (pp. 109-128). Springer VS, Wiesbaden.

Stahlmann, Volker (2008): Stahlmann, V. (2008). Lernziel: Ökonomie der Nachhaltigkeit. *Eine anwendungsorientierte Übersicht. München: oekom.*

T

(tba 2011): Technisches Betriebsamt (tba) (2011): Energie- und Verbrauchswerte, Energiemanagement der Universität und des Universitätsklinikums Tübingen.

(tba 2015): Technisches Betriebsamt (tba) (2015): Energie- und Verbrauchswerte, Energiemanagement der Universität und des Universitätsklinikums Tübingen.

Tippkötter, R., Schüwer, D., & Wallschlag, B. (2009). Leitfaden Energieeffizienz für Krankenhäuser. *Energieagentur NRW*. Düsseldorf.

(Tuschinski 2016): Tuschinski, Melita (2016): Energieausweis und neue EnEV 2014. EnEV 2014 Praxis-Hilfen: Checklisten, Bekanntmachungen, Gesetze und Normen, EnEV ab 2016: Was fragen Fachleute zur Energieeinsparverordnung? verfügbar unter: http://www.enev-online.com/enev_praxishilfen/enev_ab_2016_antworten_fragen_fachleute.htm, erneut abgerufen am 5.5.2019 und unter: <https://tuschinski.de/publikationen/>.

(Tuschinski 2020): Tuschinski, Melita (2020): Neues GebäudeEnergieGesetz GEG 2019: Was kommt wann? https://service.enev-online.de/bestellen/EnEV_2017_Was_kommt_wann_Novelle_Energieeinsparverordnung.pdf, abgerufen am 12.12.2020 und unter: <https://tuschinski.de/publikationen/>

(Tuschinski 2021): Tuschinski, Melita (2021): GebäudeEnergieGesetz - GEG 2020 – kompakt und praktisch. Das Gesetz kurz und verständlich erläutert sowie Informationen, Checklisten, Übersichten, Antworten auf Fragen und Praxiswissen. verfügbar unter: https://geg-info.de/geg_praxishilfen/M._Tuschinski_GEG_2020_kompakt_und_praktisch.pdf.

Manifest, T. (2001). Tutzing Manifest für die Stärkung der kulturell-ästhetischen Dimension Nachhaltiger Entwicklung.

U

(UBA 2008a) Umweltbundesamt (UBA) 2008): Umweltschutz im Planungsrecht. Die Verankerung des Klimaschutzes und des Schutzes der biologischen Vielfalt im raumbezogenen Planungsrecht. Dessau-Roßlau.

(UBA 2008b) Umweltbundesamt (UBA): Zentrales System Emissionen (ZSE), UBA-Datenbank zur Unterstützung der Berichterstattung, Submission 2008.

(UBA 2009) Umweltbundesamt (UBA) (2009): die CO₂-Bilanz des Bürgers. Recherche für ein internetbasiertes Tool zur Erstellung persönlicher CO₂-Bilanzen. Studie des Ifeu Heidelberg, Berlin 2009.

(UBA 2010) Umweltbundesamt (2010): 2050: 100 % - Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen, Umweltbundesamt (UBA) Für Mensch und Umwelt, 2010, Dessau-Roßlau.

(UBA 2017) Umweltbundesamt (2017): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-emissionen des Deutschen Strommix in den Jahren 1990-2016. Climate Change 15/2017, Umweltbundesamt (UBA) Fachgebiet I 2.5 Energieversorgung und –daten, Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat), Dessau-Roßlau. Verfügbar unter: [http](http://www.uba.de), abgerufen am 4.5.2019.

(UBA 2018) Umweltbundesamt (2018): Aktuelle Zahlen zur CO₂-Emissionsbilanz in der BRD und Global, Beitrag der erneuerbaren Energieträger, Dessau-Roßlau. 2018.

(UBA 2019a) Umweltbundesamt (2019): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018. Climate Change 37/2019, Umweltbundesamt (UBA). Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-07_cc-37-2019_emissionsbilanz-erneuerbarer-energien_2018.pdf, abgerufen am 09.01.2020.

(UBA 2019b) Umweltbundesamt (2019): Ist Atomstrom wirklich CO₂-frei? UBA-Fragen. Veröffentlichung um 27.11.2019, verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/ist-atomstrom-wirklich-co2-frei>, abgerufen am 09.01.2020.

(UBA 2019c) Umweltbundesamt (2019): CO₂-Bepreisung in Deutschland. Ein Überblick über die Handlungsoptionen und ihre Vor- und Nachteile. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/factsheet_co2-bepreisung_in_deutschland_2019_08_29.pdf, abgerufen am 6.4.2020.

(UBA 2021a) Umweltbundesamt (2019): Anteil erneuerbarer Energien am Strom, Wärme und Verkehr: verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>, abgerufen am 3.5.2021.

(UBA 2021b) Umweltbundesamt (2021): Nationaler Emissionshandel: Zertifikateverkauf startet Oktober 2021. Pressemitteilung des Umweltbundesamtes. verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/nationaler-emissionshandel-zertifikateverkauf>, abgerufen am 20.12.2021.

Ufrecht, W. (2006): Zur Hydrogeologie der Aquifersysteme Buntsandstein und Muschelkalk zwischen Neckar und Donau. - Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft 3/2006: 19-48; Stuttgart.

Ufrecht, W., Spitzberg, S., Schollenberger, U., & Kirchholtes, H. J. (2015). Strategie, Methoden und Untersuchungsprogramm. In *Chlorierte Kohlenwasserstoffe im Grundwasser* (pp. 45-63). Springer Vieweg, Wiesbaden.

(UN 2016) United Nations: Ziele für nachhaltige Entwicklung Bericht 2016: Verfügbar unter: <https://www.un.org/depts/german/millennium/SDG%20Bericht%202016.pdf>, erneut abgerufen am 28.06.2021.

(UN 2018) United Nations Climate Change: Off-grid and decentralized energy solutions for smart energy and water use in the agrifood chain: Technical paper by the secretariat. Nited nations Framework Convention on Climate Change: Verfügbar unter: <https://unfccc.int/documents/200379> , abgerufen am 11.12.2019.

(Uni Tü 2008): Universität Tübingen (2008): *Campus 2020, Vision Map - Meilensteine für die Zukunft*. Der Rektor Prof. Dr. Bernd Engler, Universitätsdruckerei der Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Tübingen.

(Uni Tü 2016a): Universität Tübingen (2016): Umwelterklärung 2016. Universitätsdruckerei der Eberhard-Karls-Universität Tübingen, S.50, Tübingen. Verfügbar unter: <https://uni-tuebingen.de/einrichtungen/verwaltung/viii-bau-arbeitssicherheit-und-umwelt/abteilung-3/downloads/> , erneut abgerufen am 5.5.2019.

(Uni Tü 2016b): Universität Tübingen (2016): Bis 2020: Universität verbaut 115 Millionen im Tal. Veröffentlicht vom Tübinger Liste e.V., Tübingen. Text nicht mehr verfügbar unter: <https://www.tuebingen-liste.de/universitaet-verbaut-115-millionen-im-talcampus/>, abgerufen am 11.1.2020.

(Uni Tü 2019): Umweltbericht der Universität Tübingen (2019): Energieverbrauch, Tübinger Liste e.V., verfügbar unter: <https://uni-tuebingen.de/einrichtungen/verwaltung/viii-bau-arbeitssicherheit-und-umwelt/abteilung-3/downloads/>, abgerufen ab 10.10.2021.

Universität Dresden (2010): Projektbeschreibung City-Campus Dresden, Hochschule für Technik und Verwaltung HTV, Teilprojekt Master- und Gebäudeplanung City-Campus S. 10ff, 2010.

V

(VBI-Leitfaden 2008): Verband beratender Ingenieure (VBI) (2008): VBI-Leitfaden Oberflächennahe Geothermie. Band 18 der VBI-Schriftenreihe, 2008, Berlin.

(VDEW 2007): Verband der Elektrizitätswirtschaft Baden-Württemberg e.V. (VDEW) (2007): Strompreise in Deutschland, Stand Februar 2007, BW 052-07, VdEW Baden-Württemberg, Stuttgart.

(VDI 2010): VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU) (2010): Thermische Nutzung des Untergrunds. Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. VDI-Handbuch Energietechnik: 4640/Blatt1. Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2010, Düsseldorf.

Vetter, M. (2018): GIS – Das richtige Programm für die Energiewende. In *Bausteine der Energiewende* (pp. 557-569). Springer VS, Wiesbaden.

(VuB BW 2008): Vermögen und Bau Baden-Württemberg (2008): Neuordnung des Zentralcampus der Eberhard-Karls-Universität Tübingen. Ein Projekt des Landes Baden-Württemberg vertreten durch VBA Tübingen.

(VuB RV 2018): Vermögen und Bau Ravensburg, Interne Informationen zu CO₂-Berechnung für ÖKOstrom des Landes Baden-Württemberg, Joachim Clauß, Abteilungsleiter Energiemanagement. Ravensburg 2018.

(VuB BW 2020): PV-Anlagen in landeseigenen Liegenschaften. Leitfaden zur Planung, Bau und Betrieb von Photovoltaikanlagen, Stand März 2020, Vermögen und Bau Betriebsleitung Baden-Württemberg, Stuttgart 2020.

(VuB Tü 2022): Vermögen und Bau, Amt Tübingen: Informationen zu aktuellen Mittelvergabe, informelle Verteilung nach Bedarf. Stellvertr. Amtsleitung, Tübingen 27.6.2022.

(Viessmann 2018): Produktinformationen der Firma Viessmann: verfügbar unter: Quelle: <https://www.viessmann.de/de/produkte/waermepumpe/vitocal-350-g.html> , abgerufen am 20.12.2018).

(Viessmann 2022): Kostenkalkulation für Wärmepumpen in verschiedenen Größen. Informationen von Dipl.-Ing. Jürgen Weinmann, Fachberater Wärmepumpenauslegung. Tübingen 2022.

Wagstaff, H. R. (1974): *Geography of energy*. Iowa, WC Brown Co.

Walker B, Abel N, O'Connell D and Grigg N (2016): A Resilience Approach To Conservation And Development: Working Paper Version 1.5. CSIRO, Australia. Verfügbar unter: https://www.resalliance.org/files/files/A_resilience_approach_to_conservation_and_development_V1_5_-_ePublish_version.pdf, erneut abgerufen am 13.9.2022.

Weber, F., Sprungala, M. (2012): Energetische Sanierung: Potenziale erkennen und nutzen. – Atum Immobilienmanagement UG, DCTI Deutsches CleanTech Institut (Hrsg.), Rudolpf Müller Verlag, S. 177, Köln.

Weglage, A., et al (2007): Energieausweis - Das große Kompendium. Grundlagen - Erstellung – Haftung. -A. Weglage (2010) (Hrsg.): Springer Vieweg, S. 13-73. Wiesbaden.

(Wetzel 2021): Wetzel, Daniel (Hrsg.) (2021): Der „CO₂-Schattenpreis“ droht den Staat lahmzulegen. In: die Welt, erschienen am 26.08.2021, Alexander-Springer-Verlag. Berlin. verfügbar unter: <https://www.welt.de/wirtschaft/plus233280385/Klimaschutz-Der-CO2-Schattenpreis-droht-den-Staat-lahmzulegen.html> , abgerufen am: 22.6.2022.

Wicke, L. (2005): Beyond Kyoto - A New Global Climate Certificate System. Continuing Kyoto Commitments or a Global 'Cap and Trade' Scheme for a Sustainable Climate Policy? (Hrsg.) Springer Heidelberg.

William A., J. Ackva, C. Haug, M. Montes de Oca (2017): Emissions Trading and the Role of a Long-run CarbonPrice Signal Achieving Cost-effective Emission Reductions under an Emissions Trading System. In: ICAP International Carbon Action Partnership (2018) (Hrsg.), Berlin 2018. Verfügbar unter: <https://icapcarbonaction.com/en/publications>. Abgefragt am 4.5.2019.

Wilson, J.P., Gallant, J.C. (2000): Secondary topographic attributes. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. [Eds.]: Terrain analysis: Principles and applications. New York, John Wiley & Sons, Inc., 87-131. ResearchGate.

Winkelmann, Hans-Peter (2015): Vom Umweltmanagement zum Nachhaltigkeitsprozess an Hochschulen-Der kopernikanische Ansatz. S. 113-126. In Filo Band 18. Umweltmanagement an deutschen Hochschulen: Nachhaltigkeitsperspektiven, Peter Lang Verlag, 2005, S.115-125. Frankfurt am Main.

(Wolfersdorff, v. 2021): Dr. Janine v. Wolfersdorff (2021): Das deutsche Lieferkettengesetz – und sein Abbild in der Rechnungslegung der Firmen. In (RfNE: 2021): Rat für Nachhaltige Entwicklung (2015): Deutscher Nachhaltigkeitskodex. DNK-Meldung: Gastbeitrag. Berlin 2021. verfügbar unter: <https://www.deutscher-nachhaltigkeitskodex.de/de-DE/Home/News/Sustainability-Code/2021/DNK-Gastbeitrag-JvW>, abgerufen am 27.7.2021.

Zech, K., & Lindner, M. (2018). Braucht Deutschland eine CO₂-Steuer. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 68(10), 37.

Zenke, I., & Fuhr, T. (2006). *Handel mit CO₂-Zertifikaten: ein Leitfaden*. CH Beck, München.

Zimmerer, K. S. (Ed.). (2013). *The new geographies of energy: assessment and analysis of critical landscapes*. Routledge.

Zimmerer, K. (2013). Approaching the new geographies of global energy: analytics and assessment of current energy landscapes and alternatives. In *The New Geographies of Energy* (pp. 13-22). Routledge.

Angaben zu den Quellen der von ESRI genutzten Karten

- ESRI (2022a): ArcGIS/ArcCatalog: TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet) ArcCatalog, Gis-Server, WMS TopPlusOpen, verfügbar unter: http://sgx.geodatenzentrum.de/wms_topplus_web_open?, abgerufen 10.4.2022.

- ESRI (2022b): ArcGIS/ArcCatalog: Basemap, World Imagery. Verfügbar unter:

http://goto.arcgisonline.com/maps/World_Imagery, abgerufen am 10.4.2022. Nur mit Genehmigung extern

verwendbar.- Tübinger Stadtplan (2012): Stadt Tübingen (Tü_map_grey_img) mit Erlaubnis der Stadt Tübingen Projekt IQF-Projekt (2013-2016) und für die projektinterne Promotion.

XII. Anhang

1. Rangfolgenliste 1: Universität - Indikator 1a + 1b für Photovoltaik (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Dach-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator Potenzial (kWh/m ²)	Indikator Jahresertrag (kWh/m ²)
1	7064	7064-08	Informatik	Auf dem Sand 14	2.008,34	338,58
2	7066	7066-01	Informatik	Auf dem Sand 6	2.000,10	350,31
3	6076	6076-06	Zentrum für Datenverarbeitung (ZDV)	Wilhelmstr. 106	1.988,85	349,65
4	0003	0003-02	Alte Botanik	Wilhelmstr. 5	1.970,20	344,19
5	2001	2001-17	Theologische Fakultäten / Evang. u. Kath. Fakultät	Liebermeisterstr. 12	1.948,44	341,28
6	6082	6082-01	Internationales Dozentenwohnheim	Lessingweg 1	1.948,11	317,17
7	0012	0012-09	Universitätskasse / Islamische Numismatik	Wilhelmstr. 26	1.947,06	341,36
8	7064	7064-23	Informatik	Auf dem Sand 14	1.945,83	338,60
9	0030	0030-06	Geowissenschaften (ehemalige Geographie)	Hölderlinstr. 12	1.942,31	339,59
10	6021	6021-03	Wirtschaftswiss. Fakultät, Abt. Bankwirtschaft (B1)	Nauklerstr. 37/1	1.941,97	305,20
11	0013	0013-21	Juristisches Seminar	Gmelinstr. 6	1.925,90	327,00
12	0013	0013-05	Juristisches Seminar	Gmelinstr. 6	1.921,52	334,51
13	6050	6050-12	Wirtschaftswissenschaftliches Seminar	Nauklerstr. 47	1.921,41	183,29
14	0004	0004-06	Neue Aula	Wilhelmstr. 7	1.912,90	334,06
15	0039	0039-08	Universitäts-Bibliothek Altbau (Bonatzbau)	Wilhelmstr. 32	1.908,99	335,37
16	6028	6028-01	Hausdruckerei der Zentralen Verwaltung	Köstlinstr. 6	1.907,61	334,55
17	1013	1013-04	Philosophisches Seminar alte Burse	Bursagasse 1	1.907,21	334,57
18	0003	0003-01	Alte Botanik	Wilhelmstr. 5	1.904,97	335,21
19	0004	0004-10	Neue Aula	Wilhelmstr. 7	1.902,74	331,35
20	0012	0012-01	Universitätskasse / Islamische Numismatik	Wilhelmstr. 26	1.898,27	325,00

2. Rangfolgenliste 2: Universitätsklinikum - Indikatoren 1a +1b für Photovoltaik (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Dach-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator 1a Potenzial (kWh/m ²)	Indikator 1b Jahresertrag (kWh/m ²)
1	6033	6033-03	Logopädenschule	Hölderlinstraße 21	2.053,22	183,12
2	2043	2043-05	Augenklinik Forschung und Werkstatt	Schleichstraße 16	2.044,14	354,52
3	2032	2032-12	ZMK-Laborbau	Osianderstraße 8	2.038,08	351,18
4	6047	6047-02	Forschungsverfügungsgebäude	Nägelestraße 5	2.035,10	358,19
5	4025	4025-01	Klinikumsverwaltung	Geissweg 3	2.030,69	356,54
6	2033	2033-17	Hautklinik	Liebermeisterstraße 25	2.021,40	345,58
7	6057	6057-03	Psychologisches Institut	Gartenstraße 29	2.012,25	354,63
8	2042	2042-11	Augenklinik	Schleichstraße 12	2.000,57	351,47
9	6059	6059-06	Kinderklinik Entwicklungsneurologie	Frondsbergstraße 23 + 25	1.998,71	347,22
10	2033	2033-07	Hautklinik	Liebermeisterstraße 25	1.990,42	346,60
11	2064	2064-17	Sportmedizin	Silcherstraße 5	1.983,00	341,73
12	7096	7096-03	Neubau	Frondsbergstraße 19/1	1.963,54	328,64
13	2009	2009-02	Physiologisches Institut	Gmelinstraße 5	1.959,98	336,00
14	2033	2033-09	Hautklinik	Liebermeisterstraße 25	1.957,34	342,39
15	2064	2064-21	Sportmedizin	Silcherstraße 5	1.956,58	285,62
16	2007	2007-08	Institut für Pathologie	Liebermeisterstraße 8	1.956,02	344,27
17	6046	6046-03	Med. Informationsverarbeitung	Westbahnhofstraße 53	1.952,88	342,61
18	2033	2033-05	Hautklinik	Liebermeisterstraße 25	1.939,03	317,63
19	2047	2047-04	Geographisches Institut	Rümelinstr. 23	1.936,32	318,93
20	7096	7096-07	Neubau	Frondsbergstraße 19/1	1.935,38	338,02

3. Rangfolgenliste 3: Universität - Indikator 2a für Photovoltaik (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Dach-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator 2a Preis (Euro/kWh)
1	5016	5016-01	NWI G Bau Mensa	A.d.Morgenstelle 26	0,04
2	0004	0004-08	Neue Aula	Wilhelmstr. 7	0,04
3	5010	5010-02	NWI - A-Bau	A.d.Morgenstelle 18	0,05
4	5017	5017-01	NWI - F-Bau	A.d.Morgenstelle 24	0,05
5	3005	3005-02	Sportwissenschaften	Alberstraße 27	0,05
6	0039	0039-18	Universitäts-Bibliothek Altbau (Bonatzbau)	Wilhelmstr. 32	0,05
7	1025	1025-05	Historisches Observatorium	Burgsteige 1/3	0,05
8	0050	0050-04	Neuphilologikum (Brechtbau)	Wilhelmstr. 50	0,05
9	0050	0050-03	Neuphilologikum (Brechtbau)	Wilhelmstr. 50	0,05
10	3005	3005-03	Sportwissenschaften	Alberstraße 27	0,05
11	5009	5009-04	NWI - Hörsaalzentrum	A.d.Morgenstelle	0,05
12	3001	3001-01	Sportwissenschaftliches Institut	Wilhelmstr. 124 Sport.	0,05
13	0057	0057-07	Oberschulamt Hörsaal	Keplerstraße 2	0,05
14	0004	0004-12	Neue Aula	Wilhelmstr. 7	0,05
15	5009	5009-03	NWI - Hörsaalzentrum	A.d.Morgenstelle 16	0,05
16	5009	5009-01	NWI - Hörsaalzentrum	A.d.Morgenstelle 16	0,06
17	7078	7078-04	Zentrales Möbel- und Gerätelager der Universität	Eisenbahnstr. 128	0,06
18	5049	5049-01	NWI - H-Bau	A.d.Morgenstelle	0,06
19	7066	7066-01	Informatik /Kriminologie/ Geologie	Auf dem Sand 6	0,07
20	6076	6076-06	Zentrum für Datenverarbeitung (ZDV)	Wilhelmstr. 106/Wächter76	0,07

4. Rangfolgenliste 4: Universitätsklinikum - Indikator 2a (Kilowattpreis) für Photovoltaik (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Dach-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator 2a Preis ((Euro/kWh)
1	4055	4055-01	Crona Bauteil B	Hoppe-Seyler-Straße 3	0,04
2	4006	4006-06	Casino Berg	Otfried-Müller-Straße 6	0,05
3	4037	4037-01	Neubau	Otfried-Müller-Straße 4	0,05
4	4066	4066-01	Nuklearmedizin	Otfried-Müller-Straße 14	0,05
5	4052	4052-01	Bei: Med. Klinik Bettenbau	Otfried-Müller-Straße 10	0,05
6	4064	4064-01	Neubau Bei Anatomie	Elfriede-Aulhorn-Straße 8	0,05
7	2062	2062-03	Parkhaus Innenstadtkliniken.	Röntgenweg 2	0,05
8	4009	4009-02	Parkhaus Medizinische Klinik	Otfried-Müller-Straße 8	0,05
9	4007	4007-01	Neubau bei Personalwohngebäude	Elfriede-Aulhorn-Straße 8	0,05
10	4061	4061-01	Mikrobiologie und Virologie	Elfriede-Aulhorn-Straße 6	0,05
11	4007	4007-02	Neubau bei Personalwohngebäude	Elfriede-Aulhorn-Straße 8	0,05
12	4041	4041-01	Parkhaus CRONA	Hoppe-Seyler-Straße 2	0,05
13	4051	4051-01	Med. Klinik Bettenbau	Otfried-Müller-Straße 10	0,05
14	4009	4009-01	Parkhaus Medizinische Klinik	Otfried-Müller-Straße 8	0,05
15	2031	2031-01	ZMK-Mittelbau	Osianderstraße 6	0,05
16	4006	4006-01	Casino Berg	Otfried-Müller-Straße 6	0,05
17	4004	4004-01	Medizinische Klinik	Otfried-Müller-Straße 10	0,05
18	4006	4058-05	Casino Berg	Otfried-Müller-Straße 6	0,06
19	4052	4052-03	Bei: Med. Klinik Bettenbau	Otfried-Müller-Straße 10	0,06
20	4040	4040-02	CRONA	Hoppe-Seyler-Straße 3	0,06
21	2042	2042-09	Augenklinik	Schleichstraße 12	0,06
22	4059	4059-01	Neubau Schnarrenberg Klinik	Elfriede-Aulhorn-Straße	0,06
23	4006	4006-04	Casino Berg	Otfried-Müller-Straße 6	0,06
24	4060	4060-05	HNO-Klinik	Elfriede-Aulhorn-Straße 5	0,06
25	4005	4005-01	Med. Klinik Nord (C-Bau)	Otfried-Müller-Straße 12	0,06
26	4006	4006-02	Casino Berg	Otfried-Müller-Straße 6	0,06

5. Rangfolgenliste 5: Universität – Indikator 1a Jahresarbeit für Erdwärme

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator Jahresarbeit (kWh/a)	Indikator Heizlast (kWh)
1	5009	NWI - Hörsaalzentrum	A.d.Morgenstelle 16	2.606.837,64	2.346.149,88
2	5016	NWI- G-Bau (Mensa)	Auf der Morgenstelle 26	1.939.999,07	1.745.995,16
3	0004	Neue Aula	Wilhelmstr. 7	1.350.156,42	1.215.136,78
4	5002	NWI - Botanischer Garten	Hartmeyerstr. 125	1.336.824,01	1.203.137,61
5	0039	Universitätsbibliothek Bonatzbau	Wilhelmstraße 32	1.080.567,40	972.506,66
6	5013	NWI-PN	Auf der Morgenstelle 12	1.043.629,59	939.262,63
7	1025	Historisches Observatorium	Burgsteige 11/3	909.023,38	818.117,04
8	0050	Neuphilologikum (Brechtbau)	Wilhelmstr. 50 (Trafo Wilh. 50)	878.000,30	790.196,27
9	3005	Sportwissenschaftliches Institut Neue Sporthalle	Alberstraße 27	553.323,83	497.987,45
10	7078	Zentrales Möbellager	Eisenbahnstraße 128	528.284,60	475.452,14
11	5012	NWI- C-Bau	Auf der Morgenstelle 10	520.019,86	468.013,87
12	5048	NWI Bio Hörsäle	Auf der Morgenstelle 3	511.485,21	460.332,69
13	5015	NWI- E-Bau	Auf der Morgenstelle 28	501.788,95	451.606,06
14	5018	NWI- CL-Bau	Auf der Morgenstelle 22	500.929,88	450.832,89
15	5001	NWI-Biologie	Auf der Morgenstelle 1	450.223,71	405.197,34
16	5010	NWI- A-Bau	Auf der Morgenstelle 18	433.711,22	390.336,10
17	0009	Hörsaalgebäude Kupferbau	Hölderlinstraße 5	433.153,89	389.834,50
18	0066	Universitätsbibliothek	Brunnenstraße 25-27	430.129,42	387.112,48
19	7068	Kriminologie /Geologie	Auf dem Sand 7	424.481,36	382.029,22
20	0057	Oberschulamt	Keplerstraße 2	407.132,97	366.415,67

6. Rangfolgenliste 6: Universitätsklinikum - Indikator 1a Jahresarbeit für Erdwärme

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator Jahresarbeit (kWh/a)	Indikator Heizlast (kWh)
1	4055	Crona Bauteil B	Hoppe-Seyler-Straße 3	3.115.567,62	2.804.006,86
2	4040	CRONA	Hoppe-Seyler-Straße 3	2.130.869,51	1.917.778,56
3	4009	Med. Klinik Parkhaus	Otfried-Müller-Straße 8	1.619.503,11	1.457.548,80
4	2010	Frauenklinik / Neonatologie / Genetik	Calwerstraße 7	1.282.208,12	1.153.983,31
5	4060	HNO-Klinik	Elfriede-Aulhorn-Straße 5	1.225.819,78	1.103.233,80
6	5030	NWI VG	Auf der Morgenstelle 15	1.084.636,17	976.168,55
7	4041	Parkhaus CRONA	Hoppe-Seyler-Straße 2	1.017.364,64	915.624,18
8	4006	Zentralküche mit Casino	Otfried-Müller-Straße 6	925.800,23	833.216,21
9	7093	Interfakultäres Institut für Zell Biologie	Paul-Ehrlich-Straße 15-17	799.528,65	719.571,79
10	2062	Parkhaus P3 Innenstadt	Röntgenweg 2	609.309,14	548.374,23
11	4048	Personalwohngebäude	Otfried-Müller-Straße 31	606.336,08	545.698,47
12	2021	Psychiatrische Klinik	Osianderstraße 24	600.355,77	540.316,19
13	4051	Med. Klinik Parkhaus	Otfried-Müller-Straße 10	564.908,76	508.413,88
14	4061	Mikrobiologie und Virologie	Elfriede-Aulhorn-Straße 6	542.907,78	488.613,00
15	4066	Nuklearmedizin Isotopenlabor	Otfried-Müller-Straße 14	539.283,71	485.351,34
16	4004	Med. Klinik Bettenbau Ost	Otfried-Müller-Straße 10	419.403,84	377.459,46
17	6044	Anatomisches Institut	Österbergstraße 3	408.842,29	367.954,06
18	0019	Lothar-Meyer-Bau	Wilhelmstraße 56	403.244,56	362.916,10
19	2033	Hautklinik	Liebermeisterstraße 25	397.620,32	357.854,29
20	4005	Med. Klinik Nord C- Bau	Otfried-Müller-Straße 12	388.373,69	349.532,32

7. Rangfolgenliste 7: Universität - Indikator 3a, 3b CO₂-Werte

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator 3a CO ₂ (t/a) Wärme	Indikator 3b CO ₂ (t/a) Strom
1	5010	NWI - A-Bau	Auf der Morgenstelle 18	245,41	182.739,95
2	5032	NWI Zentrallager	Auf der Morgenstelle 15	191,98	138.553,43
3	5015	NWI - E-Bau	Auf der Morgenstelle 28	581,36	108.647,63
4	5011	NWI - B-Bau	Auf der Morgenstelle 1	281,82	101.739,73
5	5048	NWI - Bio I - Hörsaalgebäude mit angebauten Gewächshäusern	Auf der Morgenstelle 3	335,26	94.907,97
6	5012	NWI - C-Bau	Auf der Morgenstelle 10	263,26	86.604,88
7	0050	Neuphilologikum (Brechtbau)	Wilhelmstr. 50	322,78	81.872,40
8	6076	Zentrum für Datenverarbeitung (ZDV)	Wilhelmstr. 106	39,29	76.923,51
9	5045	NWI - Bio I - Laborgebäude II	Auf der Morgenstelle 5	0,00	67.308,38
10	4001	Interfakultäres Institut für Biochemie, IFIB	Hoppe-Seyler-Str.4	220,46	66.699,96
11	5009	NWI - Hörsaalzentrum	Auf der Morgenstelle 16	153,78	65.269,07
12	5014	NWI - D-Bau	Auf der Morgenstelle 12	205,48	64.330,68
13	0019	Lothar-Meyer-Bau Institutsgebäude	- Wilhelmstr. 56	221,79	54.244,32
14	6040	Informatik	Auf dem Sand 13	419,89	51.268,60
15	5001	allg.Trafostr.NWI	Auf der Morgenstelle 1	2,68	39.944,08
16	5019	FWH	Auf der Morgenstelle 20	0,00	38.570,86
17	0004	Neue Aula	Wilhelmstr. 7	213,12	37.032,73
18	5002	NWI - Botanischer Garten gesamt mit Gewächshäusern	Hartmeyerstr. 125	262,40	28.214,65
19	0066	Universitäts-Bibliothek Erweiterungsbau	- Brunnenstr. 25	62,74	24.905,40
20	3001	Sportwissenschaftliches Institut	Wilhelmstr. 124	0,00	18.528,59
27	0037	Geowissenschaften	Sigwartstr. 10	0,32	14.601,32
28	2047	Geographisches Institut	Rümelinstr. 23	71,58	14.282,81
29	2047	Geographisches Institut	Rümelinstr. 23	71,58	14.282,81

8. Rangfolgenliste 8: Universitätsklinikum - Indikator 3a, 3b höchste CO₂- Verursachung

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator 3a CO ₂ (t/a) Wärme	Indikator 3b CO ₂ (t/a) Strom
1	4040	CRONA	Hoppe-Seyler-Straße 3	1.593,08	593.350,80
2	4004	Medizinische Klinik	Otfried-Müller-Straße 10	593,06	244.603,76
3	2010	Frauenklinik / Neonatologie / Genetik	Calwerstraße 7	517,01	226.831,44
4	4060	HNO-Klinik	Elfriede-Aulhorn-Straße 5	418,10	104.711,68
5	4067	FVG FORS	Otfried-Müller-Straße 27	90,87	79.261,16
6	4061	Mikrobiologie und Virologie	Elfriede-Aulhorn-Straße 6	438,26	75.057,84
7	4045	Kinderklinik	Hoppe-Seyler-Straße 1	121,49	68.627,20
8	4036	Versorgungszentrum	Otfried-Müller-Straße 4	568,02	63.868,00
9	4006	Casino Berg	Otfried-Müller-Straße 6	235,05	56.920,04
10	2085	PET - Zentrum	Röntgenweg 15	19,46	53.215,40
11	2042	Augenklinik	Schleichstraße 12	169,50	42.657,04
12	2029	Zahn Mund Kiefer Klinik	Osianderstraße	206,14	42.000,80
13	5030	NWI - VG	Auf der Morgenstelle 15	56,82	36.751,76
14	2033	Hautklinik	Liebermeisterstraße 25	168,94	34.022,60
15	2007	Institut für Pathologie	Liebermeisterstraße 8	120,52	32.694,84
16	7058	Zentrum für medizinische Forschung	Waldhörnlestraße 22	168,95	31.984,00
17	0019	Lothar-Meyer-Bau (Medizin)	Wilhelmstraße 56	101,31	25.232,32
18	2019	Laborgebäude	Röntgenweg 11	46,68	25.059,88
19	0029	Institut für Arbeits- und Sozialmedizin	Wilhelmstraße 27	101,43	23.934,28
20	2021	Psychiatrische Klinik	Osianderstraße 24	150,38	23.097,36

9. Rangfolgenliste 9: Universität - Indikator 4a Wärmeverbrauch (2015) (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator Wärmeverbrauch (kWh/a)	Verbrauchspreis (Euro/kWh _{we})
1	5015	NWI - E-Bau	Auf der Morgenstelle 28	6.388.530,00	0,10
2	5048	NWI - Bio I - Hörsaalgebäude	Auf der Morgenstelle 3	3.679.645,00	0,10
3	0050	Neuphilologikum (Brechtbau)	Wilhelmstr. 50 (Trafo Wilh. 50)	3.547.060,00	0,09
4	5011	NWI - B-Bau	Auf der Morgenstelle 1	3.096.971,00	0,10
5	5012	NWI - C-Bau	Auf der Morgenstelle 10	2.892.988,00	0,10
6	5002	NWI - Botanischer Garten	Hartmeyerstr. 125	2.883.528,00	0,10
7	5010	NWI - A-Bau	Auf der Morgenstelle 18	2.696.860,00	0,10
8	0019	Lothar-Meyer-Bau -	Wilhelmstr. 56	2.430.575,00	0,05
9	4001	Interfakultäres Institut für Biochemie, IFIB	Hoppe-Seyler-Str.4	2.420.291,00	0,10
10	0004	Neue Aula	Wilhelmstr. 7	2.341.980,00	0,09
11	5014	NWI - D-Bau	Auf der Morgenstelle 12	2.258.020,00	0,10
12	5032	NWI Zentrallager	Auf der Morgenstelle 15	2.108.187,00	0,09
13	6040	Informatik	Auf dem Sand 13	1.891.414,00	0,00
14	3005	Sportwissenschaftliches Institut - Neue Sporthalle	Alberstraße 27	1.841.570,00	0,10
15	5009	NWI - Hörsaalzentrum	Auf der Morgenstelle 16	1.689.909,00	0,10
16	1001	SCHLOSS HOHENTÜBINGEN / Ur- und Frühgesch.	Schloss Burgsteige 11	1.547.992,00	0,00
17	2050	Institut für Ökum. Forschung	Liebermeisterstr. 18	1.168.855,00	0,09
18	0030	Geowissenschaften (ehemalige Geographie)	Hölderlinstr. 12	1.072.390,00	0,09
19	5049	NWI - H-Bau	Auf der Morgenstelle 6	1.011.350,00	0,10
20	1010	Heizzentrale für Münz- und Bursagasse	Bursagasse 5	847.417,00	0,00

10. Rangfolgenliste 10: Universität - Heizölverbrauch (2015) (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Heizölverbrauch (kWh _w /a)
1	6071	Medizinisch-naturwissenschaftl. Forschungszentrum (MNF)	Ob dem Himmelreich 7	41.727,00
2	6104	Institut für Erziehungswissenschaften	Europastr. 6	23.809,37
3	6061	Orientalisches Seminar -Brasilienzentrum	Wilhelmstr. 113	20.002,00
4	7024	Biologisches Institut - Lehrstuhl für Genetik	Heuberger-Tor-W.	8.310,00
5	6069	Geowissenschaften, Institut	Hölderlinstr. 29	8.003,00
6	6103	Wirtschaftswissenschaftliches Institut	Nauklerstr. 48	7.995,00
7	5003	NWI - Physikalisches Institut - Ionenbeschleuniger	Rosenau 2	3.669,00
8	6001	Projekte Orientalistik	Haußerstr. 43	2.904,65
9	5048	NWI - Bio I - Hörsaalgebäude	Auf der Morgenstelle 3	2.069,00
10	5065	Notstromaggregate bei ÜW	Auf der Morgenstelle 6	1.244,00
11	0019	Lothar-Meyer-Bau - Institutsgebäude	Wilhelmstr. 56	1.076,00
12	5032	NWI Zentrallager	A.d.Morgenst. 15	687,00

11. Rangfolgenliste 11: Universität – Erdgasverbrauch (2015) (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Erdgasverbrauch (kWh _w /a)
1	6040	Informatik	Sand	1.891.414,00
2	1001	SCHLOSS HOHENTÜBINGEN / Ur- und Frühgesch.	Schloss Burgsteige 11	1.547.992,00
3	1010	Heizzentrale für Münz- und Bursagasse	Bursagasse 5	847.417,00
4	7057	Seminar für Sinologie und Koreanistik	Wilhelmstr. 133	221.244,00
5	6075	Zentrum für Datenverarbeitung (ZDV)	Wilhelmstr. 106	197.636,00
6	1004	Erziehungswissenschaften (HE), Institut	Münzgasse 11	166.077,00
7	6029	Politikwissenschaftliches Institut	Melanchthonstr.36	164.275,00
8	8013	Musikw.	Pfleg Hof	161.972,00
9	6079	Gästehaus der Universität / Tagungsstätte	Lessingweg 3	132.794,00
10	6082	Internationales Dozentenwohnheim	Lessingweg 1	101.429,00
11	6057	Medizinische Psychologie	Gartenstr. 29	78.065,00
12	0017	Geologisches Institut	Nauklerstr. 5	67.832,92
13	6065	Japanologie - Seminar	Wilhelmstr. 90	64.746,00
14	7049	Psychologisches Institut - Med. Psychologie	Christophstr. 2	62.027,00
15	6053	Seminar für Sprachwissenschaften	Haußerstr. 11	55.486,00
16	0007	SFB-Kriegserfahrung	Brunnenstr. 30	49.337,00
17	0034	EDV - Organisation	Rümelinstr. 32	47.040,00
18	7034	Dekanat Geowissenschaftliche Fakultät	Sigwartstr. 17	44.115,00
19	7018	Medizinische Psychologie	Biesingerstr. 26	41.428,75
20	6081	Sportinstitut	Gartenstr. 188	12.854,00

12. Rangfolgenliste 12: Universitätsklinikum - Indikator 4a Wärmeverbrauch (2015) (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator Verbrauch Wärme in kWh/a	VerbrauchsPreis (kWh _{we} /a)
1	4040	CRONA	Hoppe-Seyler-Straße 3	17.491.026,00	0,09
2	4004	Medizinische Klinik	Otfried-Müller-Straße 10	6.517.051,00	0,09
3	4036	Versorgungszentrum	Otfried-Müller-Straße 4	6.242.000,00	0,09
4	2010	Frauenklinik / Neonatologie / Genetik	Calwerstraße 7	5.667.913,00	0,09
5	4061	Mikrobiologie und Virologie	Elfriede-Aulhorn-Straße 6	4.813.648,00	0,09
6	4060	HNO-Klinik	Elfriede-Aulhorn-Straße 5	4.594.194,00	0,09
7	4006	Casino Berg	Otfried-Müller-Straße 6	2.583.000,00	0,09
8	2029	Zahn Mund Kiefer Klinik	Osianderstraße	2.260.173,00	0,10
9	2042	Augenklinik	Schleichstraße 12	1.858.184,00	0,10
10	2033	Hautklinik	Liebermeisterstraße 25	1.852.095,00	0,09
11	2021	Psychiatrische Kl.	Osianderstraße 24	1.652.580,00	0,09
12	4030	Krankenpflegeschule	Otfried-Müller-Straße 39	1.629.000,00	0,09
13	4015	Personalwohngebäude	Ob der Grafenhalde 2	1.487.000,00	0,09
14	4045	Kinderklinik	Hoppe-Seyler-Straße 1	1.335.000,00	0,09
15	2007	Institut für Pathologie	Liebermeisterstraße 8	1.321.327,00	0,09
16	4050	Entsorgungszentrale	Otfried-Müller-Straße 2	1.203.000,00	0,09
17	0029	Institut für Arbeits- und Sozialmedizin	Wilhelmstraße 27	1.114.380,00	0,09
18	0019	Lothar-Meyer-Bau (Medizin)	Wilhelmstraße 56	1.113.264,00	0,10
19	4063	Anatomie	Elfriede-Aulhorn-Straße 8	1.097.000,00	0,09
20	4067	FVG FORS	Otfried-Müller-Straße 27	998.247,00	0,09

13. Rangfolgenliste 13: Universitätsklinikum – Heizölverbrauch (2015) (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Heizölverbrauch (kWh_w/a)
1	6071	Medizinisches Forschungszentrum	Ob dem Himmelreich 7 + 9	8.212,00
2	4040	CRONA	Hoppe-Seyler-Straße 3	7.005,00
3	2010	Frauenklinik / Neonatologie / Genetik	Calwerstraße 7	2.432,00
4	2042	Augenklinik	Schleichstraße 12	2.015,00
5	2033	Hautklinik	Liebermeisterstraße 25	2.000,00
6	2007	Institut für Pathologie	Liebermeisterstraße 8	1.353,00
7	0065	ZIT-Schulungszentrum	Wöhrdstraße 8	Pauschal
8	6066	Interdisziplinäres Tumorzentrum	Herrenberger Straße 23	Pauschal
9	6073	Logopädenschule	Hölderlinstraße 31	Pauschal
10	6046	Med. Informationsverarbeitung	Westbahnhofstraße 53	Pauschal

14. Rangfolgenliste 14: Universitätsklinikum – Erdgasverbrauch (2015) (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Erdgasverbrauch (kWh_{w/a})
1	7058	Zentrum für medizinische Forschung	Waldhörnlestraße 22	761.026,00
2	7087	Personalwohngebäude	Breiter Weg 10	223.768,00
3	6084	Physiologisches Institut	Keplerstraße 15	207.998,00
4	6059	Kinderklinik Entwicklungsneurologie	Frondsbergstraße 23 + 25	172.865,00
5	6047	Forschungsverfügungsgebäude	Nägelestraße 5	170.475,00
6	7054	Gerontopsychiatrische Tagesklinik	Stauffenbergstraße 10	155.632,00
7	6057	Psychologisches Institut	Gartenstraße 29	150.729,00
8	7048	Personalwohngebäude	Autenriethstraße 15	148.351,00
9	7047	Personalwohngebäude	Hechinger Straße 46	143.366,00
10	7005	Personalwohngebäude	Hechinger Straße 23	128.164,00
11	6086	Personalwohngebäude	Hallstattstraße 29	118.944,00
12	2024	Psychiatrische Kl. Gärtnerei	Osianderstraße 22/2	113.012,00
13	7046	Personalwohngebäude	Hechinger Straße 40	110.128,00
14	6012	Tagesklinik Psychiatrie	Wildermuthstraße 10	102.753,00
15	6062	Kindertagesstätte	Justinus-Kerner-Straße 6	100.003,00
16	6048	Gerichtsmedizin	Gartenstraße 47	98.880,00
17	6006	Med. Informationsverarbeitung	Westbahnhofstraße 55	74.418,00
18	2061	Personalwohngebäude	Calwerstraße 4	63.551,00
19	6071	Medizinisches Forschungszentrum	Ob dem Himmelreich 7 + 9	61.628,00
20	7018	Institut für Medizinische Psychologie	Biesingerstraße 26	23.142,00

15. Rangfolgenliste 15: Universität - Indikator 4b Stromverbrauch (2015) (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator Stromverbrauch (kWh/a)
1	5010	NWI - A-Bau	Auf der Morgenstelle 18	4.568.498,65
2	5032	NWI Zentrallager	Auf der Morgenstelle 15	3.463.835,81
3	5015	NWI - E-Bau	Auf der Morgenstelle 28	2.716.190,65
4	5011	NWI - B-Bau	Auf der Morgenstelle 10	2.543.493,37
5	5048	NWI - Bio I - Hörsaalgebäude mit angebauten Gewächshäusern	Auf der Morgenstelle 3	2.372.699,20
6	5012	NWI - C-Bau	Auf der Morgenstelle 10	2.165.121,92
7	0050	Neuphilologikum (Brechtbau)	Wilhelmstr. 50	2.046.810,12
8	6076	Zentrum für Datenverarbeitung (ZDV)	Wilhelmstr. 106	1.923.087,75
9	5045	NWI - Bio I - Laborgebäude II	A.d. Morgenstelle 5	1.682.709,61
10	4001	Interfakultäres Institut für Biochemie, IFIB	Hoppe-Seyler-Str.4	1.667.499,00
11	5009	NWI - Hörsaalzentrum	Auf der Morgenstelle 16	1.631.726,67
12	5014	NWI - D-Bau	Auf der Morgenstelle 26	1.608.267,00
13	0019	Lothar-Meyer-Bau - Institutsgebäude	Wilhelmstr. 56	1.356.108,05
14	6040	Informatik	Auf dem Sand 13	1.281.715,00
15	5001	allg.Trafostr.NWI	Auf der Morgenstelle 1	998.601,93
16	5019	FWH	Auf der Morgenstelle 20	964.271,48
17	0004	Neue Aula	Wilhelmstr. 7	925.818,30
18	5002	NWI - Botanischer Garten	Hartmeyerstr. 125	705.366,37
19	0066	Universitäts-Bibliothek – Erweiterungsbau	Brunnenstr. 25	622.635,10
20	3001	Sportwissenschaftliches Institut	Wilhelmstr. 124	463.214,75
27	0037	Geowissenschaften	Sigwartstr. 10	365.032,96
28	2047	Geographisches Institut	Rümelinstr. 23	357.070,35
29	2047	Geographisches Institut	Rümelinstr. 23	357.070,35

16. Rangfolgenliste 16: Universitätsklinikums - Indikator 4b Stromverbrauch (2015) (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator Stromverbrauch (kWh/a)
1	4040	CRONA	Hoppe-Seyler-Straße 3	2.008.808,42
2	4004	Medizinische Klinik	Otfried-Müller-Straße 10	828.113,98
3	2010	Frauenklinik / Neonatologie / Genetik	Calwerstraße 7	767.945,21
4	4060	HNO-Klinik	Elfriede-Aulhorn-Straße 5	354.504,80
5	4067	FVG FORS	Otfried-Müller-Straße 27	268.341,23
6	4061	Mikrobiologie und Virologie	Elfriede-Aulhorn-Straße 6	254.110,76
7	4045	Kinderklinik	Hoppe-Seyler-Straße 1	232.339,62
8	4036	Versorgungszentrum	Otfried-Müller-Straße 4	216.227,19
9	4006	Casino Berg	Otfried-Müller-Straße 6	192.704,65
10	2085	PET - Zentrum	Röntgenweg 15	180.162,47
11	5030	NWI - VG	Auf der Morgenstelle 15	153.071,08
12	2042	Augenklinik	Schleichstraße 12	144.416,80
13	2029	Zahn Mund Kiefer Klinik	Osianderstraße	142.195,07
14	2033	Hautklinik	Liebermeisterstraße 25	115.184,62
15	0019	Lothar-Meyer-Bau (Medizin)	Wilhelmstraße 56	112.599,25
16	2007	Institut für Pathologie	Liebermeisterstraße 8	110.689,44
17	7058	Zentrum für medizinische Forschung	Waldhörnlestraße 22	108.787,98
18	0029	Institut für Arbeits- und Sozialmedizin	Wilhelmstraße 27	106.634,40
19	2019	Laborgebäude	Röntgenweg 11	84.841,04
20	2021	Psychiatrische Kl.	Osianderstraße 24	78.196,86

17. Rangfolgenliste 17: Universität - Gesamtkosten des Energieverbrauchs (2015) (eigene Darstellung)

Platz	Gebäude.-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator Gesamtkosten Wärme/Strom (Euro/a)
1	5015	NWI - E-Bau	Auf der Morgenstelle 28	1.111.691,93
2	5010	NWI - A-Bau	Auf der Morgenstelle 18	1.058.387,57
3	5048	NWI - Bio I - Hörsaalgebäude	Auf der Morgenstelle 3	785.554,14
4	5011	NWI - B-Bau	Auf der Morgenstelle 10	751.526,99
5	5012	NWI - C-Bau	Auf der Morgenstelle 10	670.582,63
6	5032	NWI Zentrallager	Auf der Morgenstelle 15	621.198,49
7	0050	Neuphilologikum (Brechtbau)	Wilhelmstr. 50	532.807,78
8	5014	NWI - D-Bau	Auf der Morgenstelle 26	502.274,80
9	4001	Interfakultäres Institut für Biochemie, IFIB	Hoppe-Seyler-Str.4	479.917,44
10	5009	NWI - Hörsaalzentrum	Auf der Morgenstelle 16	439.230,03
11	5002	NWI - Botanischer Garten	Hartmeyerstr. 125	404.892,14
12	0004	Neue Aula	Wilhelmstr. 7	380.834,36
13	6076	Zentrum für Datenverarbeitung (ZDV)	Wilhelmstr. 106	377.050,13
14	6040	Informatik	Auf dem Sand 13	364.523,18
15	5045	NWI - Bio I - Laborgebäude II	Auf der Morgenstelle 5	291.342,50
16	0019	Lothar-Meyer-Bau - Institutsgebäude	Wilhelmstr. 56	250.773,10
17	3005	Sportwissenschaftliches Institut - Neue Sporthalle	Alberstraße 27	204.304,74
18	1001	SCHLOSS HOHENTÜBINGEN / Ur- und Frühgesch.	Schloss Burgsteige 11	190.910,48
19	0066	Universitäts-Bibliothek - Erweiterungsbau	Brunnenstr. 25	170.151,34
20	5049	NWI - H-Bau	Auf der Morgenstelle 6	169.761,78
21	2047	Geographisches Institut	Rümelinstr. 23	141.742,32
22	2047	Geographisches Institut	Rümelinstr. 23	141.742,32
23	0030	Geowissenschaften (ehemalige Geographie)	Hölderlinstr. 12	129.488,09

18. Rangfolgenliste 18: Universitätsklinikum - Gesamtkosten des Energieverbrauchs (2015) (eigene Darstellung)

Platz	Geb.-Nr.	Bezeichnung	Straße	Indikator Gesamtkosten Wärme /Strom (Euro/a)
1	4040	CRONA	Hoppe-Seyler-Straße 3	3.584.482,02
2	4004	Medizinische Klinik	Otfried-Müller-Straße 10	1.412.458,37
3	2010	Frauenklinik / Neonatologie / Genetik	Calwerstraße 7	1.294.820,19
4	4036	Versorgungszentrum	Otfried-Müller-Straße 4	775.884,91
5	4060	HNO-Klinik	Elfriede-Aulhorn-Straße 5	766.445,51
6	4061	Mikrobiologie und Virologie	Elfriede-Aulhorn-Straße 6	685.724,52
7	4006	Casino Berg	Otfried-Müller-Straße 6	424.296,43
8	2029	Zahn Mund Kiefer Klinik	Osianderstraße 2	361.617,05
9	4067	FVG FORS	Otfried-Müller-Straße 27	357.869,22
10	4045	Kinderklinik	Hoppe-Seyler-Straße 1	352.035,72
11	2042	Augenklinik	Schleichstraße 12	322.029,22
12	2033	Hautklinik	Liebermeisterstraße 25	290.083,04
13	2007	Institut für Pathologie	Liebermeisterstraße 8	235.394,79
14	2021	Psychiatrische Kl.	Osianderstraße 24	232.133,51
15	0019	Lothar-Meyer-Bau (Medizin)	Wilhelmstraße 56	219.317,37
16	0029	Institut für Arbeits- und Sozialmedizin	Wilhelmstraße 27	210.004,72
17	5030	NWI - VG	Auf der Morgenstelle 15	206.927,83
18	2085	PET - Zentrum	Röntgenweg 15	200.204,82
19	4030	Krankenpflegeschule	Otfried-Müller-Straße 39	192.793,82
20	4015	Personalwohngebäude	Ob der Grafenhalde	161.936,77

19. Rangfolge der besten Teildachflächen für Photovoltaik *Tübingens next top places – Top 20* der Universitätsgebäude (UNI) (eigene Darstellung)

Finale Rangfolge	Gebäude -Nr.	Dach-Nr.	Gesamtpunkte	Indikator 1b Jahresertrag (kWh/m ²)	Rangfolge 1b	Gewichtung 60% Punkte	Indikator 2a Preis (Euro/kWh)	Rangfolge 2a	Gewichtung 30% Punkte	Indikator 3a (CO ₂ /m ²)	Rangfolge 3a	Gewichtung 10 % Punkte
1	7066	7066-01	321,34	350,31	528	316,80	0,07	510	0,02	45,19	1	4,52
2	6076	6076-06	320,73	349,65	527	316,20	0,07	509	0,02	45,10	2	4,51
3	0003	0003-02	320,07	344,19	526	315,60	0,11	351	0,03	44,40	3	4,44
4	0012	0012-09	319,44	341,36	525	315,00	0,11	346	0,03	44,04	4	4,40
5	2001	2001-17	318,83	341,28	524	314,40	0,11	347	0,03	44,02	5	4,40
6	0030	0030-06	318,21	339,59	523	313,80	0,11	343	0,03	43,81	6	4,38
7	7064	7064-23	317,60	338,60	522	313,20	0,11	345	0,03	43,68	7	4,37
8	7064	7064-08	317,00	338,58	521	312,60	0,10	356	0,03	43,68	8	4,37
9	0039	0039-08	316,35	335,37	520	312,00	0,07	505	0,02	43,26	9	4,33
10	0003	0003-01	315,75	335,21	519	311,40	0,07	502	0,02	43,24	10	4,32
11	1013	1013-04	315,14	334,57	518	310,80	0,07	503	0,02	43,16	11	4,32
12	6028	6028-01	314,54	334,55	517	310,20	0,07	504	0,02	43,16	12	4,32
13	0013	0013-05	313,94	334,51	516	309,60	0,07	507	0,02	43,15	13	4,32
14	0004	0004-06	313,33	334,06	515	309,00	0,07	506	0,02	43,09	14	4,31
15	0004	0004-10	312,70	331,35	514	308,40	0,07	501	0,02	42,74	15	4,27
16	5002	5002-10	312,09	331,23	513	307,80	0,07	499	0,02	42,73	16	4,27
17	7029	7029-04	311,50	330,68	512	307,20	0,11	331	0,03	42,66	17	4,27
18	7030	7030-05	310,88	329,26	511	306,60	0,11	329	0,03	42,47	18	4,25
19	1016	1016-03	310,26	328,26	510	306,00	0,07	500	0,02	42,35	19	4,23
20	1007	1007-01	309,65	327,47	509	305,40	0,07	498	0,02	42,24	20	4,22
21	0013	0013-21	309,05	327,00	508	304,80	0,11	337	0,03	42,18	21	4,22

20. Rangfolge der besten Teildachflächen für Photovoltaik *Tübingens next top places – Top 20* des Universitätsklinikums (UNI) (eigene Darstellung)

Finale Rangfolge	Gebäude-Nr.	Dach-Nr.	Gesamtpunkte	Indikator 1b Jahresertrag (kWh/m ²)	Rangfolge 1b	Gewichtung 60% Punkte	Indikator 2a Preis (Euro/kWh)	Rangfolge 2a	Gewichtung 30% Punkte	Indikator 3a (CO ₂ /m ²)	Rangfolge 3a	Gewichtung 10 % Punkte
1	6047	6047-02	285,45120	358,19	468	280,80	0,10	285	0,03061	46,21	468	4,62059
2	4025	4025-01	284,81884	356,54	467	280,20	0,07	442	0,01951	45,99	467	4,59933
3	6057	6057-03	284,20561	354,63	466	279,60	0,10	280	0,03095	45,75	466	4,57466
4	2043	2043-05	283,60378	354,52	465	279,00	0,10	287	0,03050	45,73	465	4,57327
5	2042	2042-11	282,95463	351,47	464	278,40	0,07	439	0,02060	45,34	464	4,53403
6	2032	2032-12	282,35044	351,18	463	277,80	0,07	441	0,02027	45,30	463	4,53017
7	6059	6059-06	281,71029	347,22	462	277,20	0,10	277	0,03119	44,79	462	4,47910
8	2033	2033-07	281,09192	346,60	461	276,60	0,07	438	0,02073	44,71	461	4,47119
9	2033	2033-17	280,48889	345,58	460	276,00	0,10	281	0,03088	44,58	460	4,45801
10	2007	2007-08	279,87287	344,27	459	275,40	0,11	270	0,03184	44,41	459	4,44102
11	6046	6046-03	279,24078	342,61	458	274,80	0,07	433	0,02111	44,20	458	4,41967
12	2033	2033-09	278,63786	342,39	457	274,20	0,07	434	0,02107	44,17	457	4,41679
13	2064	2064-17	278,02916	341,73	456	273,60	0,07	437	0,02083	44,08	456	4,40833
14	2064	2064-05	277,38806	338,51	455	273,00	0,07	432	0,02132	43,67	455	4,36674
15	2018	2018-02	276,78474	338,24	454	272,40	0,07	429	0,02144	43,63	454	4,36330
16	7096	7096-07	276,19267	338,02	453	271,80	0,11	266	0,03220	43,60	453	4,36047
17	7042	7042-01	275,57022	337,12	452	271,20	0,07	430	0,02143	43,49	452	4,34879
18	2032	2032-11	274,96155	336,45	451	270,60	0,07	431	0,02134	43,40	451	4,34021
19	2009	2009-02	274,36623	336,00	450	270,00	0,11	271	0,03184	43,34	450	4,33439
20	6087	6087-02	273,75252	335,74	449	269,40	0,07	427	0,02154	43,31	449	4,33098

21. Rangfolge der besten Gebäudegrundflächen für Erdwärme *Tübingens next top places – Top 20* der Universitätsgebäude (UNI (eigene Darstellung)⁶¹)

Finale Rangfolge	Gebäude-Nr.	Gesamtpunkte	Indikator 1b Heizlast	Rangfolge 1b	Gewichtung 60% Punkte	Indikator 2a Preis (Euro/kWh)	Rangfolge 2a	Gewichtung 30% Punkte	Indikator 3a (CO ₂ /m ²)	Rangfolge 3a	Gewichtung 10% Punkte
1	5009	67,7598	2.346.149,88	108	64,8000	0,10	107	0,0313	29,28	8	2,9285
2	5016	67,1245	1.745.995,16	107	64,2000	0,10	108	0,0313	28,93	11	2,8933
3	5002	65,9241	1.203.137,61	105	63,0000	0,11	97	0,0333	28,91	12	2,8909
4	0004	65,3763	1.215.136,78	106	63,6000	0,11	98	0,0332	17,43	68	1,7431
5	5013	64,6552	939.262,63	103	61,8000	0,11	86	0,0341	28,21	20	2,8211
6	0039	64,1974	972.506,66	104	62,4000	0,11	89	0,0339	17,64	61	1,7636
7	1025	63,3044	818.117,04	102	61,2000	0,12	71	0,0352	20,69	32	2,0692
8	0050	62,3615	790.196,27	101	60,6000	0,12	68	0,0355	17,26	76	1,7261
9	3005	61,9534	497.987,45	100	60,0000	0,13	47	0,0389	19,15	38	1,9145
10	5012	61,8380	468.013,87	98	58,8000	0,13	45	0,0392	29,99	5	2,9988
11	7078	61,5162	475.452,14	99	59,4000	0,13	46	0,0391	20,77	31	2,0771
12	5048	61,1890	460.332,69	97	58,2000	0,13	43	0,0394	29,50	7	2,9496
13	5015	60,5333	451.606,06	96	57,6000	0,13	42	0,0397	28,94	10	2,8936
14	5018	59,9284	450.832,89	95	57,0000	0,13	41	0,0397	28,89	14	2,8887
15	5001	59,4369	405.197,34	94	56,4000	0,14	32	0,0411	29,96	6	2,9957
16	5010	58,7188	390.336,10	93	55,8000	0,11	105	0,0330	28,86	15	2,8858
17	0009	57,0172	389.834,50	92	55,2000	0,11	104	0,0330	17,84	50	1,7842
18	7068	56,6558	382.029,22	90	54,0000	0,11	100	0,0331	26,23	23	2,6227
19	0066	56,4048	387.112,48	91	54,6000	0,11	103	0,0330	17,72	59	1,7717
20	5049	55,7149	329.822,92	88	52,8000	0,11	102	0,0330	28,82	17	2,8818

⁶¹ Vollständige Rangfolgenlisten sind im Anhang zu finden mit Adressen und Namen der Standorte. Hier für die Veröffentlichung anonymisiert.

22. Rangfolge der besten Teildachflächen für Erdwärme *Tübingens next top places – Top 20* der Universitätsklinikumsgebäude (UKT) (eigene Darstellung) ⁶²

Finale Rangfolge	Gebäude-Nr.	Gesamtpunkte	Indikator 1b Heizlast	Rangfolge 1b	Gewichtung 60% Punkte	Indikator 2a Preis (Euro/kWh)	Rangfolge 2a	Gewichtung 30% Punkte	Indikator 3a (CO ₂ /m ²)	Rangfolge 3a	Gewichtung 10% Punkte
1	4055	53,02	2.804.006,86	84	50,40	0,10	1	0,0307	25,91	72	2,5913
2	4040	52,47	1.917.778,56	83	49,80	0,11	3	0,0323	26,33	77	2,6331
3	4009	51,83	1.457.548,80	82	49,20	0,11	2	0,0322	25,94	75	2,5942
4	4060	50,68	1.103.233,80	80	48,00	0,11	8	0,0330	26,51	78	2,6508
5	2010	50,48	1.153.983,31	81	48,60	0,11	7	0,0328	18,49	27	1,8485
6	5030	50,11	976.168,55	79	47,40	0,11	15	0,0338	26,81	80	2,6806
7	4041	49,42	915.624,18	78	46,80	0,11	23	0,0343	25,88	71	2,5883
8	7093	48,93	719.571,79	76	45,60	0,12	35	0,0355	32,93	83	3,2933
9	4006	48,90	833.216,21	77	46,20	0,12	33	0,0350	26,69	79	2,6694
10	4048	46,94	545.698,47	74	44,40	0,13	54	0,0378	24,98	63	2,4975
11	2062	46,92	548.374,23	75	45,00	0,13	53	0,0378	18,82	42	1,8823
12	4051	45,81	508.413,88	72	43,20	0,13	57	0,0386	25,72	69	2,5718
13	2021	45,76	540.316,19	73	43,80	0,13	55	0,0380	19,23	48	1,9234
14	4061	45,40	488.613,00	71	42,60	0,13	60	0,0391	27,62	81	2,7624
15	4066	44,63	485.351,34	70	42,00	0,13	62	0,0392	25,92	74	2,5916
16	4004	44,02	377.459,46	69	41,40	0,11	10	0,0332	25,91	73	2,5913
17	6044	42,80	367.954,06	68	40,80	0,11	11	0,0333	19,65	54	1,9647
18	0019	41,89	362.916,10	67	40,20	0,11	12	0,0334	16,61	6	1,6610
19	4005	41,62	349.532,32	65	39,00	0,11	5	0,0327	25,84	70	2,5842
20	2033	41,44	357.854,29	66	39,60	0,11	4	0,0326	18,10	20	1,8102

⁶² Vollständige Rangfolgenlisten sind im Anhang zu finden mit Adressen und Namen der Standorte. Hier für die Veröffentlichung anonymisiert.

(23) Rangfolgen der höchsten Energieverbraucher - Tübingens worst places - Höchster Handlungsbedarf an Gebäuden der Universität (UNI)

Finale Rangfolge	Gebäude-Nr.	Gesamtpunkte	4a Indikator Verbrauch Wärme (kWh/a)	Gewichtung 60% Punkte	2a Preis (Euro/kWh)	Gewichtung 30% Punkte	3a Indikator t CO ₂ /a Wärme	Gewichtung 10% Punkte	4b Indikator Verbrauch Strom (kWh/a)	Gewichtung 60% Punkte	2a Preis (Euro/kWh)	Gewichtung 30% Punkte	3a Indikator t CO ₂ /a Strom	Gewichtung 10% Punkte
1	5015	140,0821	6.388.530,00	60,6000	0,10	0,0301	581,36	10,1000	2.716.190,65	59,4000	0,17	0,0519	108.647,63	9,9000
2	5048	137,7825	3.679.645,00	60,0000	0,10	0,0306	335,26	9,8000	2.372.699,20	58,2000	0,17	0,0519	94.907,97	9,7000
3	5011	137,0821	3.096.971,00	58,8000	0,10	0,0301	281,82	9,6000	2.543.493,37	58,8000	0,17	0,0519	101.739,73	9,8000
4	5010	137,0817	2.696.860,00	57,0000	0,10	0,0297	245,41	9,3000	4.568.498,65	60,6000	0,17	0,0519	182.739,95	10,1000
5	0050	135,6584	3.547.060,00	59,4000	0,09	0,0269	322,78	9,7000	2.046.810,12	57,0000	0,10	0,0315	81.872,40	9,5000
6	5012	134,9826	2.892.988,00	58,2000	0,10	0,0307	263,26	9,5000	2.165.121,92	57,6000	0,17	0,0519	86.604,88	9,6000
7	5032	132,8642	2.108.187,00	54,0000	0,09	0,0266	191,98	8,8000	3.463.835,81	60,0000	0,13	0,0376	138.553,43	10,0000
8	4001	129,3728	2.420.291,00	55,8000	0,10	0,0300	220,46	9,1000	1.667.499,00	55,2000	0,14	0,0428	66.699,96	9,2000
9	0019	127,9431	2.430.575,00	56,4000	0,05	0,0156	221,79	9,2000	1.356.108,05	53,4000	0,09	0,0275	54.244,32	8,9000
10	5014	126,5817	2.258.020,00	54,6000	0,10	0,0297	205,48	8,9000	1.608.267,00	54,0000	0,17	0,0519	64.330,68	9,0000
11	5002	125,8812	2.883.528,00	57,6000	0,10	0,0295	262,40	9,4000	705.366,37	50,4000	0,17	0,0518	28.214,65	8,4000
12	6040	125,0524	1.891.414,00	53,4000	0,00	0,0000	419,89	10,0000	1.281.715,00	52,8000	0,17	0,0524	51.268,60	8,8000
13	5009	124,4797	1.689.909,00	52,2000	0,10	0,0286	153,78	8,5000	1.631.726,67	54,6000	0,17	0,0512	65.269,07	9,1000
14	0004	123,7809	2.341.980,00	55,2000	0,09	0,0278	213,12	9,0000	925.818,30	51,0000	0,18	0,0530	37.032,73	8,5000
15	1001	116,8576	1.547.992,00	51,6000	0,00	0,0000	343,65	9,9000	389.142,15	47,4000	0,19	0,0576	15.565,69	7,9000
16	6076	116,7826	431.731,00	43,8000	0,10	0,0307	39,29	7,1000	1.923.087,75	56,4000	0,17	0,0519	76.923,51	9,4000
17	5049	114,0821	1.011.350,00	49,8000	0,10	0,0302	92,03	8,2000	392.453,38	48,0000	0,17	0,0519	15.698,14	8,0000
18	0066	112,7791	689.397,00	46,8000	0,09	0,0267	62,74	7,8000	622.635,10	49,8000	0,17	0,0524	24.905,40	8,3000
19	2047	108,5774	786.540,00	48,6000	0,12	0,0346	71,58	8,1000	357.070,35	44,4000	0,14	0,0428	14.282,81	7,4000
20	2047	107,1774	786.540,00	48,0000	0,12	0,0346	71,58	8,0000	357.070,35	43,8000	0,14	0,0428	14.282,81	7,3000

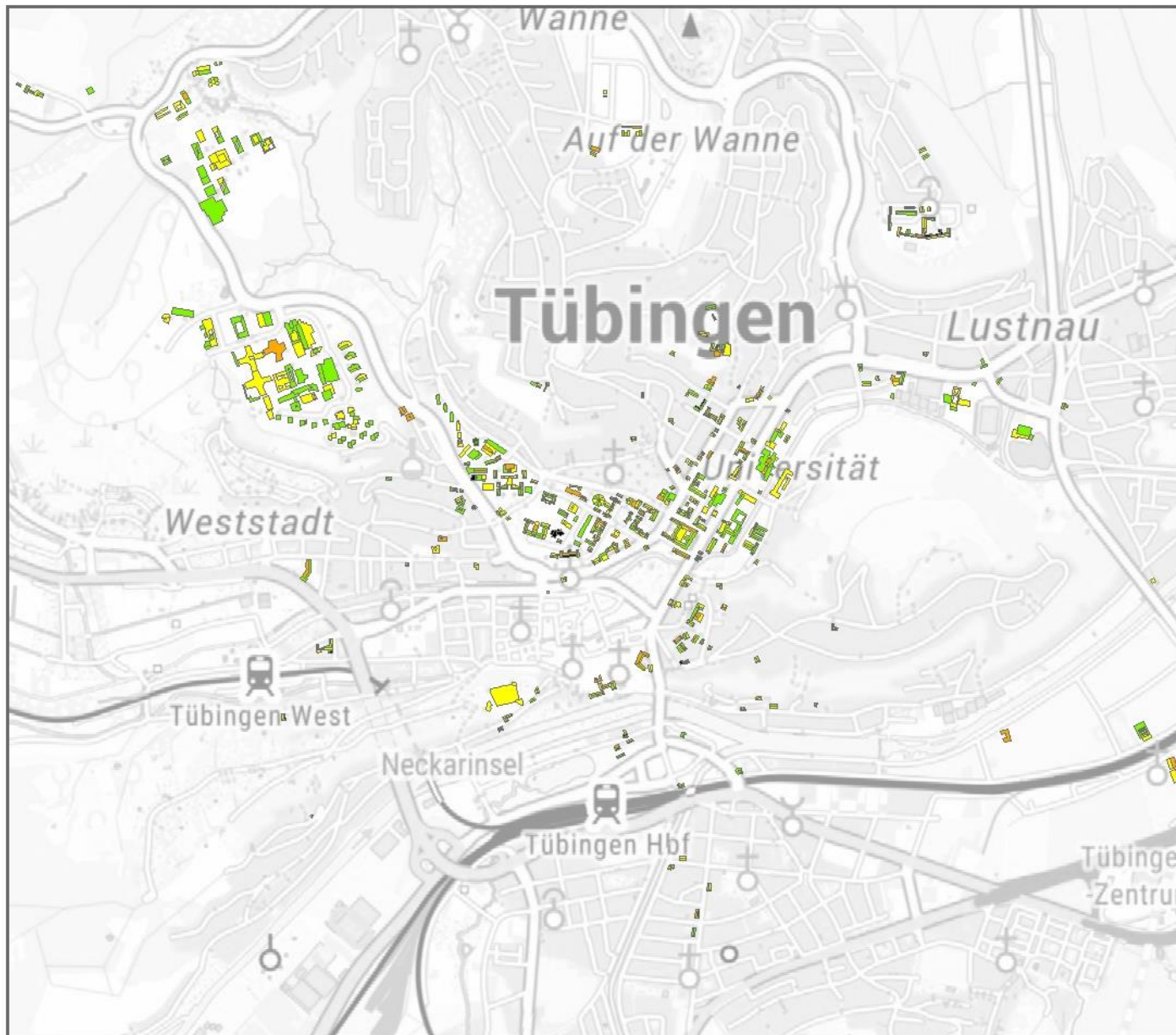
(24) Rangfolgen der höchsten Energieverbraucher – Tübingens worst places - höchster Handlungsbedarf an Gebäuden des Universitätsklinikums (UKT)

Finale Rangfolge	Geb.-Nr.	Gesamtpunkte	4a Indikator Verbrauch Wärme (kWh/a)	Gewichtung 60% Punkte	2a Preis (Euro/kWh)	Gewichtung 30% Punkte	3a Indikator t CO ₂ /a Wärme	Gewichtung 10% Punkte	4b Indikator Verbrauch Strom (kWh/a)	Gewichtung 60% Punkte	2a Preis (Euro/kWh)	Gewichtung 30% Punkte	3a Indikator t CO ₂ /a Strom	Gewichtung 10% Punkte
1	4040	109,168	17.491.026,00	46,800	0,09	0,027	1.593,08	7,800	14.833.770,00	46,800	0,14	0,041	593.350,80	7,700
2	4004	107,768	6.517.051,00	46,200	0,09	0,027	593,06	7,700	6.115.094,00	46,200	0,14	0,041	244.603,76	7,600
3	2010	105,668	5.667.913,00	45,000	0,09	0,028	517,01	7,500	5.670.786,00	45,600	0,14	0,041	226.831,44	7,500
4	4060	103,568	4.594.194,00	43,800	0,09	0,027	418,10	7,300	2.617.792,00	45,000	0,14	0,041	104.711,68	7,400
5	4036	102,868	6.242.000,00	45,600	0,09	0,027	568,02	7,600	1.596.700,00	42,600	0,14	0,041	63.868,00	7,000
6	4061	102,868	4.813.648,00	44,400	0,09	0,027	438,26	7,400	1.876.446,00	43,800	0,14	0,041	75.057,84	7,200
7	4006	99,368	2.583.000,00	43,200	0,09	0,027	235,05	7,200	1.423.001,00	42,000	0,14	0,041	56.920,04	6,900
8	2029	96,570	2.260.173,00	42,600	0,10	0,029	206,14	7,100	1.050.020,00	40,200	0,14	0,041	42.000,80	6,600
9	2042	96,569	1.858.184,00	42,000	0,10	0,029	169,50	7,000	1.066.426,00	40,800	0,14	0,041	42.657,04	6,700
10	4045	95,768	1.335.000,00	39,000	0,09	0,027	121,49	6,400	1.715.680,00	43,200	0,14	0,041	68.627,20	7,100
11	2033	93,669	1.852.095,00	41,400	0,09	0,028	168,94	6,800	850.565,00	39,000	0,14	0,041	34.022,60	6,400
12	4067	92,968	998.247,00	35,400	0,09	0,027	90,87	5,800	1.981.529,00	44,400	0,14	0,041	79.261,16	7,300
13	2007	89,469	1.321.327,00	38,400	0,09	0,028	120,52	6,300	817.371,00	38,400	0,14	0,041	32.694,84	6,300
14	2021	88,769	1.652.580,00	40,800	0,09	0,028	150,38	6,700	577.434,00	35,400	0,14	0,041	23.097,36	5,800
15	0019	85,982	1.113.264,00	36,600	0,10	0,029	101,31	6,000	630.808,00	37,200	0,18	0,054	25.232,32	6,100
16	0029	85,281	1.114.380,00	37,200	0,09	0,028	101,43	6,100	598.357,00	36,000	0,18	0,053	23.934,28	5,900
17	4030	84,568	1.629.000,00	40,200	0,09	0,027	148,24	6,600	345.128,00	32,400	0,14	0,041	13.805,12	5,300
18	7058	84,541	761.026,00	33,600	0,00	0,000	168,95	6,900	799.600,00	37,800	0,14	0,041	31.984,00	6,200
19	5030	83,976	624.355,00	32,400	0,09	0,026	56,82	5,400	918.794,00	39,600	0,17	0,050	36.751,76	6,500
20	4063	81,768	1.097.000,00	36,000	0,09	0,027	99,83	5,900	426.279,00	34,200	0,14	0,041	17.051,16	5,600

(25) Beispiel für die Verteilung des jährlichen Budgets für Photovoltaikanlagen für 2023 -2024 (eigene Darstellung)

<i>Jahresplan</i>	3,6 Mio.	Standortvorschlag	Flächengröße in m²	Jahresertrag in kWh	Investitionen (Euro im 1. Jahr)	Gesamtkosten (Euro auf 20 Jahre)	CO₂-Reduzierung (CO₂ t)	
<i>2023</i>	450.000,00	6076-06	259,38	90.691,70	74.233,93	125.296,90	11.699,23	
<i>Top 20</i>		0003-01	267,67	89.724,28	76.675,21	129.406,16	11.574,43	
		1013-04	239,42	80.102,86	68.374,64	115.430,88	10.333,27	
		0039-08	230,54	77.313,93	65.931,86	111.291,65	9.973,50	
		0004-06	147,74	49.352,77	42.003,22	70.940,67	6.366,51	
		6028-01	145,4	48.644,13	41.513,27	70.084,91	6.275,09	
		7066-01	131,89	46.202,24	37.606,58	63.497,46	5.960,09	
		0004-10	127,48	42.240,87	36.143,21	61.059,95	5.449,07	
	Gesamtwerte			1549,52	524.272,78	442.481,92	747.008,58	67.631,19 t CO₂
<i>2024</i>	450.000,00	1007-01	115,16	37.711,98	32.723,61	55.271,06	4.864,85	
<i>Top 20</i>		5002-10	105,67	35.002,50	30.279,31	51.101,64	4.515,32	
		1016-03	84,96	27.888,83	23.934,03	40.458,97	3.597,66	
		0013-05	74,1	24.787,54	21.002,19	35.481,98	3.197,59	
		0030-06	51,48	17.480,76	22.936,71	37.390,14	2.255,02	
		7029-04	32,62	10.786,99	14.526,63	23.681,35	1.391,52	
		0012-09	29,09	9.930,01	12.997,27	21.183,71	1.280,97	
		7064-23	24,14	8.172,49	10.704,08	17.454,42	1.054,25	
		2001-17	17,13	5.845,33	7.645,49	12.461,83	754,05	
		7064-08	16,02	5.422,52	6.882,44	11.245,67	699,5	
		0013-21	15,9	5.199,94	6.882,16	11.239,98	670,79	
		7030-05	15,5	5.104,73	6.881,16	11.220,09	658,51	
	Gesamtwerte			581,77	193.333,62	207.334,70	1.822.208,00	24.940,03

Anhang des DIN A4 Kartenmaterial



Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 1a Energiepotenzial Photovoltaik

Erläuterung

Indikator 1a: Flächenbewertung nach
Energiepotenzial für PV-Strom in kWh/m² pro Jahr
(Potenzialanalyse 2016).

Der Indikator gibt die Eignung des Standorts
nach dem natürlichen Einstrahlungspotenzial
auf allen Teildachflächen an.
Die Flächenbewertung ist in 5 Klassen
ohne Abzüge von Verlusten
angegeben. Die Übersichtskarte zeigt alle
untersuchten Teildachflächen, die sich in
Exposition, Neigung, Einstrahlungswinkel,
Ausrichtung, Verschattung, Flächengröße
und Standort unterscheiden.

Legende

PV-Solar: Indikator 1a Energiepotenzial

kWh/m² pro Jahr

- keine Daten vorhanden (31)
- Klasse 1: sehr geringes Potenzial (0-500 kWh/a) (1)
- Klasse 2: niedriges Potenzial (bis 1.000 kWh/a) (185)
- Klasse 3: durchschn. Potenzial (bis 1.500 kWh/a) (514)
- Klasse 4: gutes Potenzial (bis 2.000 kWh/a) (554)
- Klasse 5: sehr gutes Potenzial (bis max. 2.085 kWh/a) (14)

TopPlusOpen P50 Graustufen (O bsolet)

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N

Projection: Transverse Mercator

Datum: WGS 1984

False Easting: 500.000,0000

False Northing: 0,0000

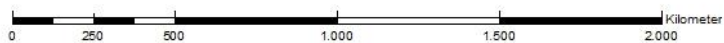
Central Meridian: 9,0000

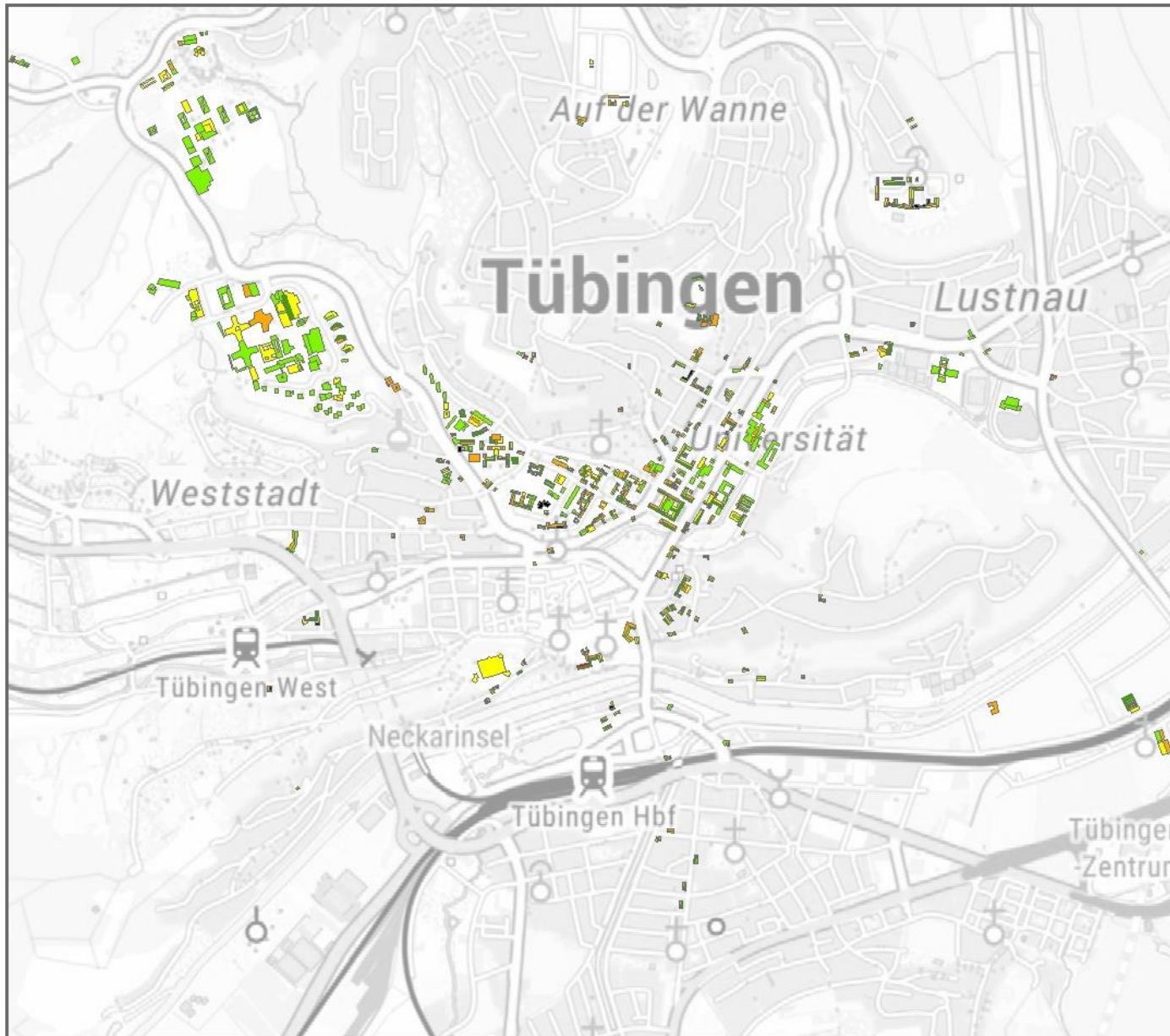
Scale Factor: 0,9996

Latitude Of Origin: 0,0000

Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 1b Jahresertrag pro kWh/m² Photovoltaik

Erläuterung

Indikator 1b: Flächenbewertung nach
Jahresertrag pro Quadratmeter in kWh/m².

Der Indikator gibt die Eignung des Daches als
Durchschnittswert pro Quadratmeter für alle
Teildachflächen an. Die Karte teilt die Werte
in 5 Klassen (Equal Breaks) - ohne Abzüge von
Verlusten - ein.

Legende

Jahresertrag kWh/m²

kWh/m²

- keine Daten vorhanden (31)
- Klasse 1: sehr gering (bis 100 kWh/m²) (7)
- Klasse 2: niedrig (bis 200 kWh/m²) (339)
- Klasse 3: relativ gut (bis 250 kWh/m²) (306)
- Klasse 4: gut (bis 300 kWh/m²) (432)
- Klasse 5: sehr gut (bis max. 365 kWh/m²) (182)

TopPlusOpen P50 Graustufen (O bsolet)

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N

Projection: Transverse Mercator

Datum: WGS 1984

False Easting: 500.000,0000

False Northing: 0,0000

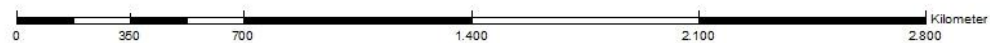
Central Meridian: 9,0000

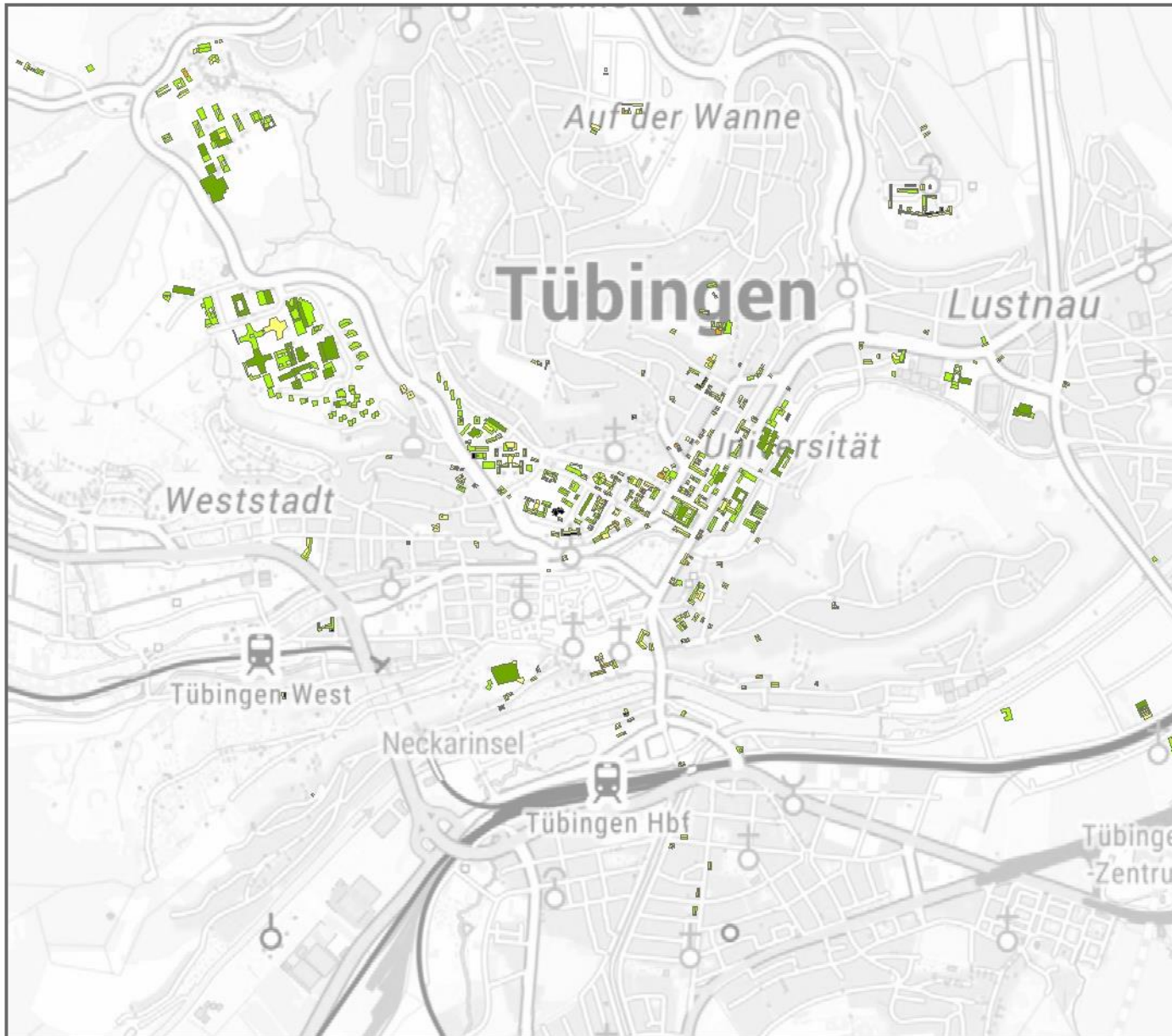
Scale Factor: 0,9996

Latitude Of Origin: 0,0000

Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 2a
Preis pro Energieeinheit - Photovoltaik

Erläuterung

Indikator 2a: Flächenbewertung nach
Preis pro Energieeinheit - in Euro/ kWh

Der Indikator gibt an, welche Teildachflächen
in der Eigenproduktion von PV-Strom die
geringsten Kosten aufweisen. Ausgehend von
den Gesamtkosten (Investitionen/Betriebskosten
für 20 Jahre und der Strommenge in 20 Jahren).

Die Karte teilt alle untersuchten Teildachflächen
nach Preis pro kWh in 5 Klassen ein.

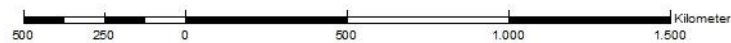
Legende

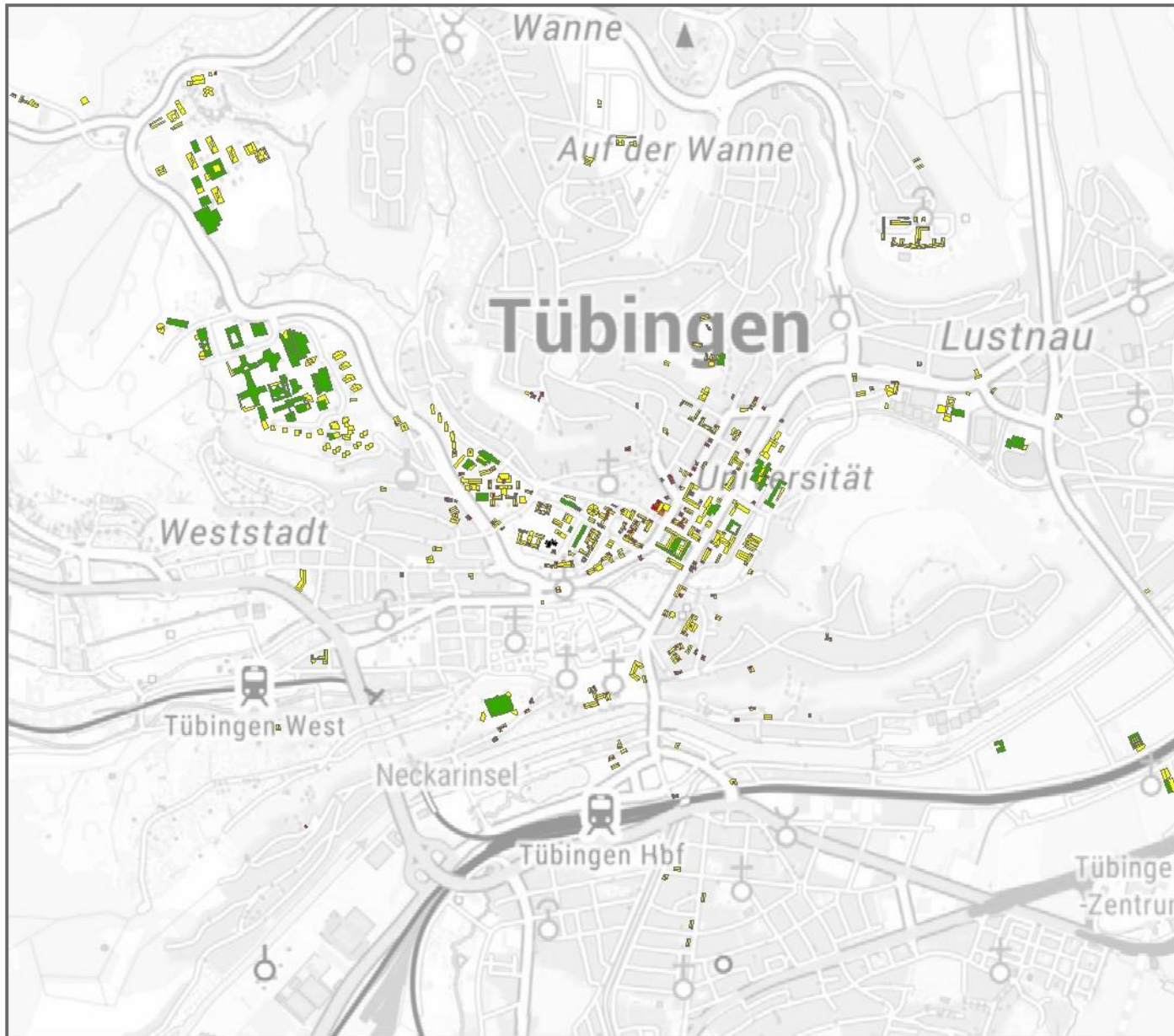
PV-Solar: Indikator 2a Preis pro Energieeinheit
Cent/kWh

- keine Daten vorhanden (31)
- Klasse 1: Preis sehr gering (bis 5 Cent/kWh) (38)
- Klasse 2: Preis niedrig (bis 10 Cent/kWh) (408)
- Klasse 3: Preis moderat (bis 20 Cent/kWh) (699)
- Klasse 4: Preis erhöht (bis 30 Cent/kWh) (111)
- Klasse 5: Preis teuer (bis 40 Cent/kWh) (12)

TopPlusOpen P50 Graustufen (obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 2b
Preis pro Quadratmeter (Euro/m²)
Photovoltaik

Erläuterung

Indikator 2b: Flächenbewertung nach
Preis pro Quadratmeter - in Euro/m²

Der Indikator gibt an, welche Teildachflächen
in der Eigenproduktion von PV-Strom die geringsten
Quadratmeterpreis aufweisen. Ausgehend von den
Gesamtkosten (Investitionen und Betriebskosten
für 20 Jahre und der Strommenge in 20 Jahren).
Die Karte teilt alle untersuchten Teildachflächen
nach Preis pro m² in 5 Klassen ein.

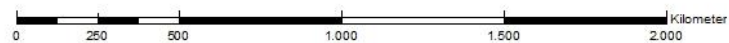
Legende

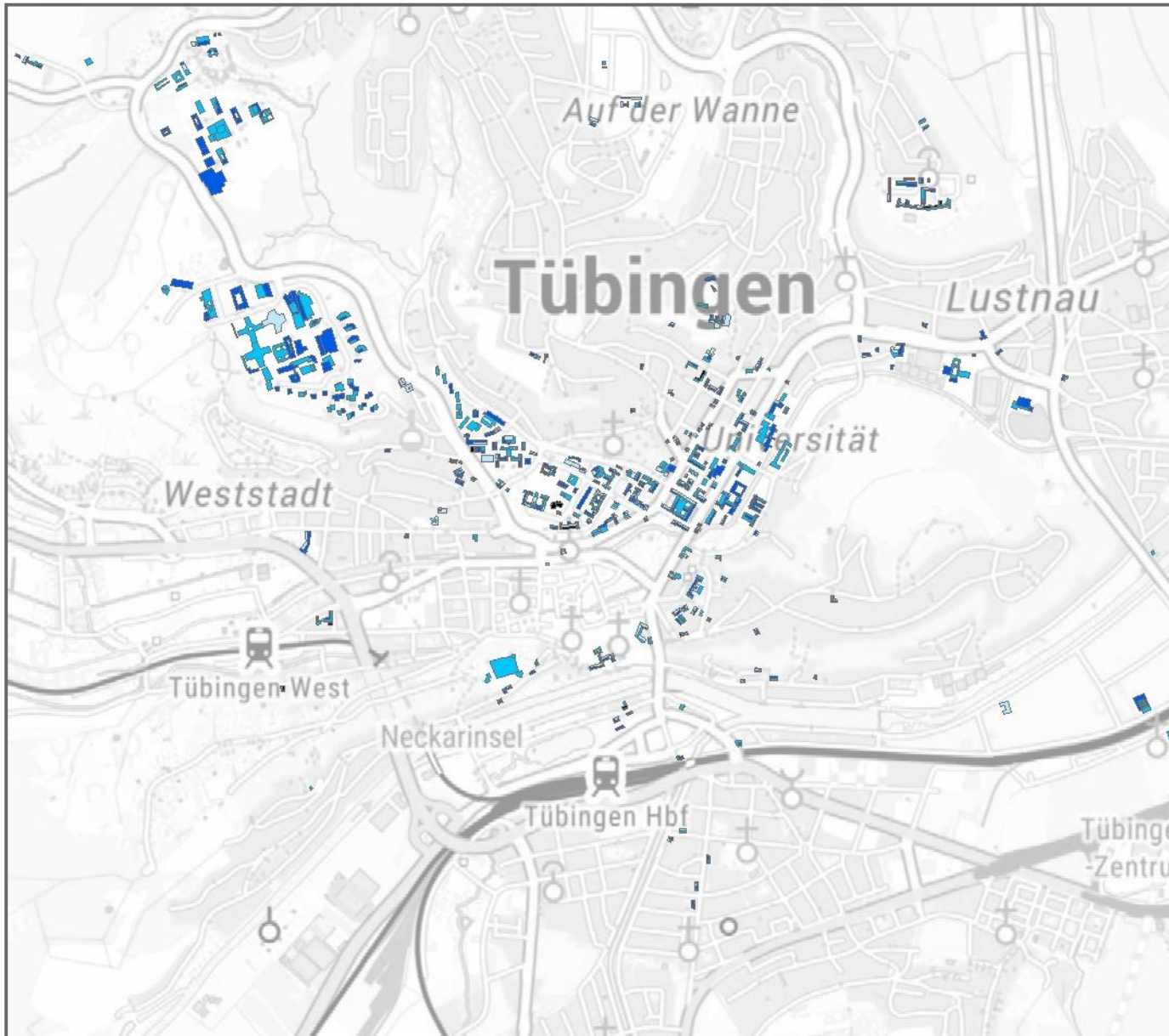
PV-Solar: Indikator 2b Preis pro Quadratmeter
Euro/m²

- keine Daten vorhanden (4)
- Klasse 1: sehr günstig (bis 300 Euro/m²) (57)
- Klasse 2: niedrig (bis 400 Euro/m²) (2)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 500 Euro/m²) (607)
- Klasse 4: erhöht (bis 600 Euro/m²) (20)
- Klasse 5: kostenintensiv (bis 740,00 Euro/m²) (609)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 3a
CO₂ - Emissionen in CO₂ t/m²
Photovoltaik

Erläuterung

Indikator 3a: Flächenbewertung nach
CO₂-Emissionen - in Tonnen CO₂ t/m² pro Jahr.

Der Indikator gibt den CO₂-Wert an, der für den
PV-Stromertrag pro Teildachfläche steht.
Ausgehend vom berechneten Jahresertrag und
dem CO₂-Äquivalent für Solarstrom ergibt sich
der CO₂-Wert für die Teildachflächen pro Jahr.
Die Karte teilt alle untersuchten Teildachflächen
in 5 Klassen nach CO₂ - Tonnen pro m² ein.

Legende

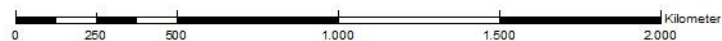
PV-Solar: Indikator 3a CO₂ t/m²

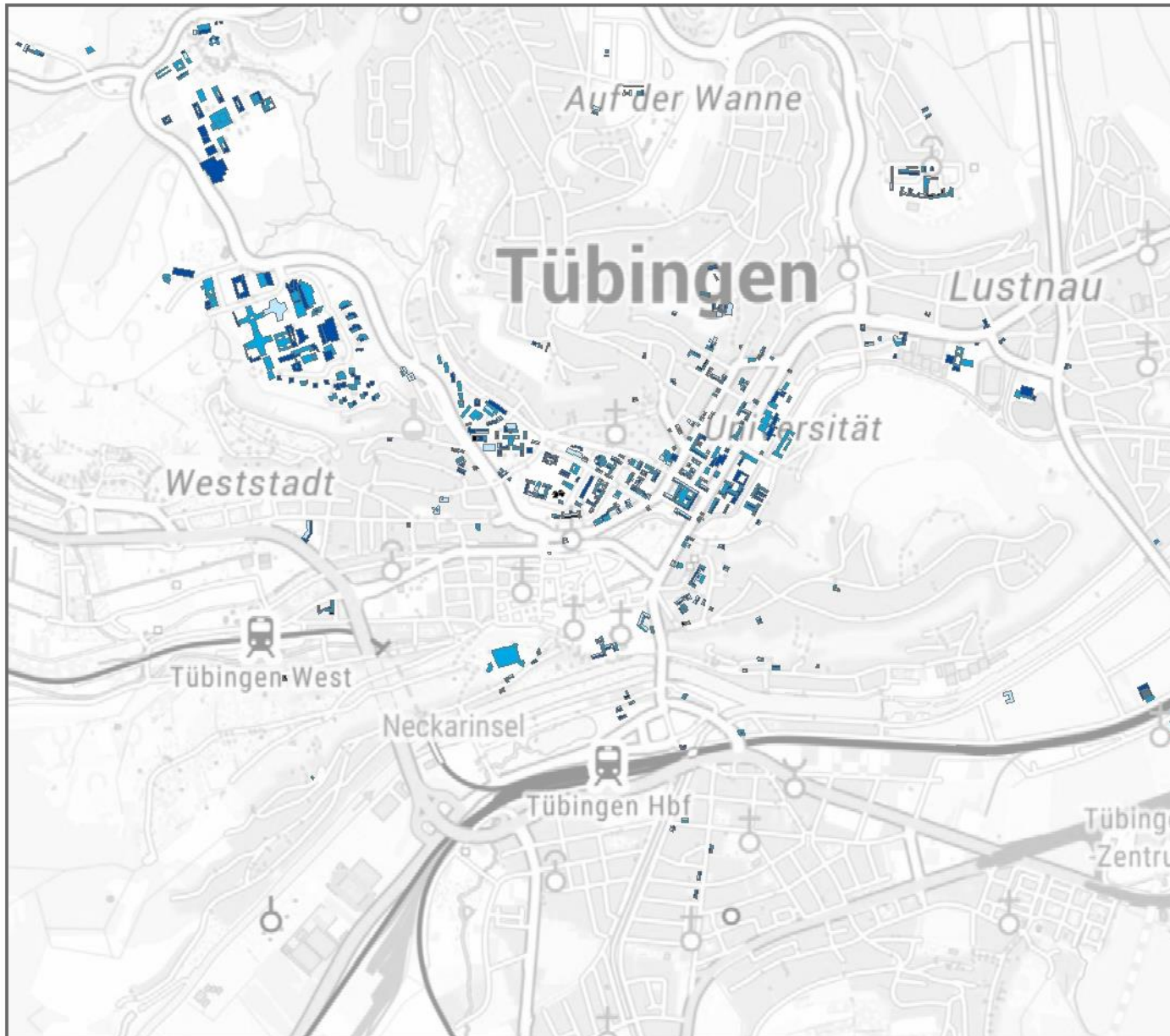
CO₂ t/m²

- keine Daten vorhanden (31)
- Klasse 1: gering (bis 25 t CO₂/m²) (299)
- Klasse 2: durchschnittlich (bis 35 t CO₂/m²) (537)
- Klasse 3: hoch (bis 47 t CO₂/m²) (432)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 3b CO₂ - Abgabe in Euro pro m² Photovoltaik

Erläuterung

Indikator 3b: Flächenbewertung nach
CO₂-Abgabe in Euro pro m² pro Jahr.

Der Indikator gibt den Euro-Wert der
CO₂-Emissionen an, der sich pro Quadratmeter
ergibt. Ausgehend vom berechneten CO₂-Wert
pro Teildachfläche pro Jahr ergibt sich im
Szenario "200 Euro pro CO₂ t" eine
CO₂-Abgabe abhängig von der Solarstrommenge.
Die Karte teilt alle untersuchten Teildachflächen
in 5 Klassen nach CO₂ - Euro pro m² ein.

Legende

PV-Solar: Indikator 3b CO₂/m²

CO₂-Abgabe in Euro/m² (200Et)

- keine Daten vorhanden (31)
- Klasse 1: geringste (bis 5 Euro/m²) (300)
- Klasse 2: moderate (bis 7 Euro/m²) (536)
- Klasse 3: höchste (bis max. 9,4 Euro/m²) (432)

TopPlusOpen P50 Graustufen (0 bis 100)

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N

Projection: Transverse Mercator

Datum: WGS 1984

False Easting: 500.000,0000

False Northing: 0,0000

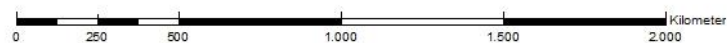
Central Meridian: 9,0000

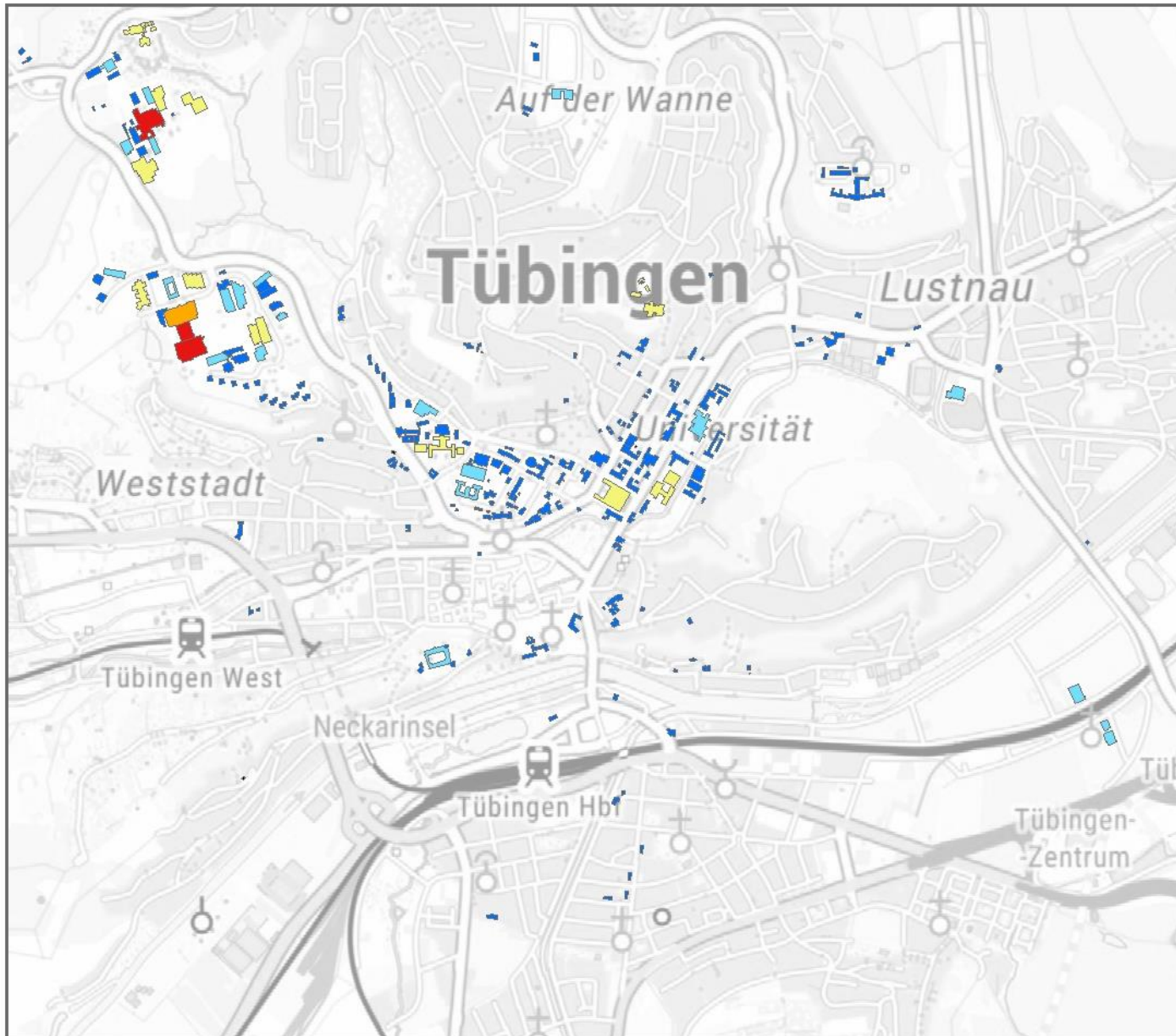
Scale Factor: 0,9996

Latitude Of Origin: 0,0000

Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 1a Energiepotenzial Erdwärme

Erläuterung

Indikator 1a: Flächenbewertung nach Energiepotenzial für Erdwärme in MWh/m² pro Jahr (Potenzialanalyse 2016). Der Indikator gibt die Eignung des Standorts nach dem natürlichen Wärmepotenzial auf den Gebäudegrundflächen an. Die Flächenbewertung ist in 5 Klassen (Equal Breaks) ohne Abzüge von Verlusten angegeben. Die Übersichtskarte zeigt die untersuchten Gebäudegrundflächen, die sich in Flächengröße, Höhe über NN., maximal möglicher Bohrtiefe (bis Haßmersheimer Schichten), unterscheiden.

Legende

Erdwärme: Indikator 1a

MWh/m² pro Jahr

- keine Daten vorhanden (4)
- Klasse 1: sehr geringes Potenzial (0-500 MWh/a) (232)
- Klasse 2: niedriges Potenzial (500-1.000 MWh/a) (22)
- Klasse 3: durchschn. Potenzial (1.000-2.000 MWh/a) (24)
- Klasse 4: gutes Potenzial (2.000-2.500 MWh/a) (1)
- Klasse 5: sehr gutes Potenzial (2.500-3.120 MWh/a) (3)

TopPlusOpen P50 Graustufen (0 bsolet)

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N

Projection: Transverse Mercator

Datum: WGS 1984

False Easting: 500.000,0000

False Northing: 0,0000

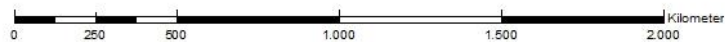
Central Meridian: 9,0000

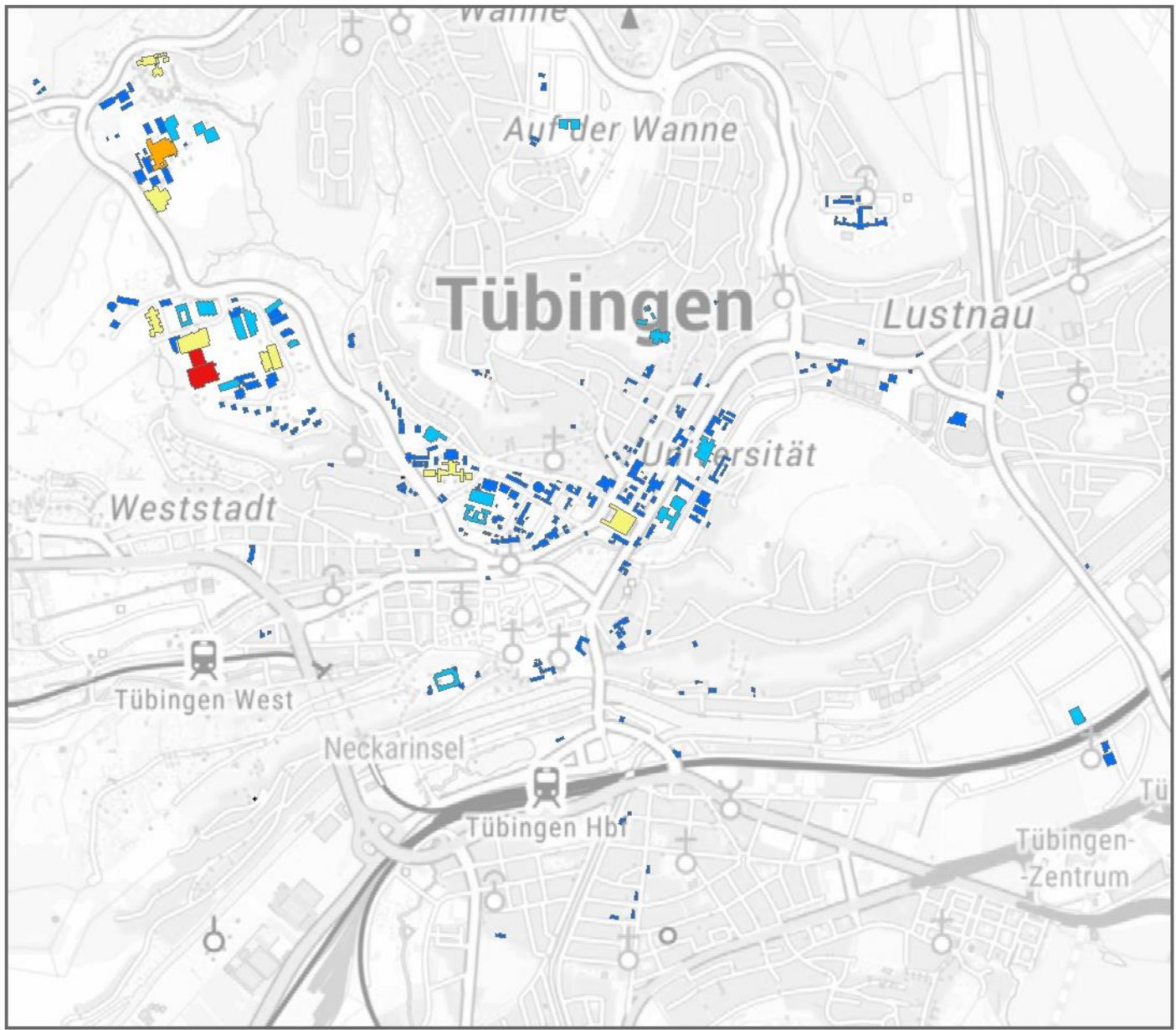
Scale Factor: 0,9996

Latitude Of Origin: 0,0000

Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 1b
Energiepotenzial Erdwärme
Heizlast pro Standort

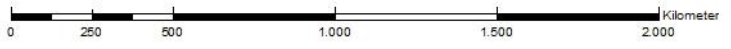
Erläuterung
Indikator 1b: Flächenbewertung nach Heizlast pro Standort in MWh pro Jahr. Der Indikator gibt das Wärmepotenzial als Heizlast (Nutzenergie/COP=4) an, die sich abzüglich der Verluste (Faktor 9%) ergibt. Die Gebäudegrundfläche zeigt die Heizlast pro Standort in 5 Klassen (Equal Breaks) an.

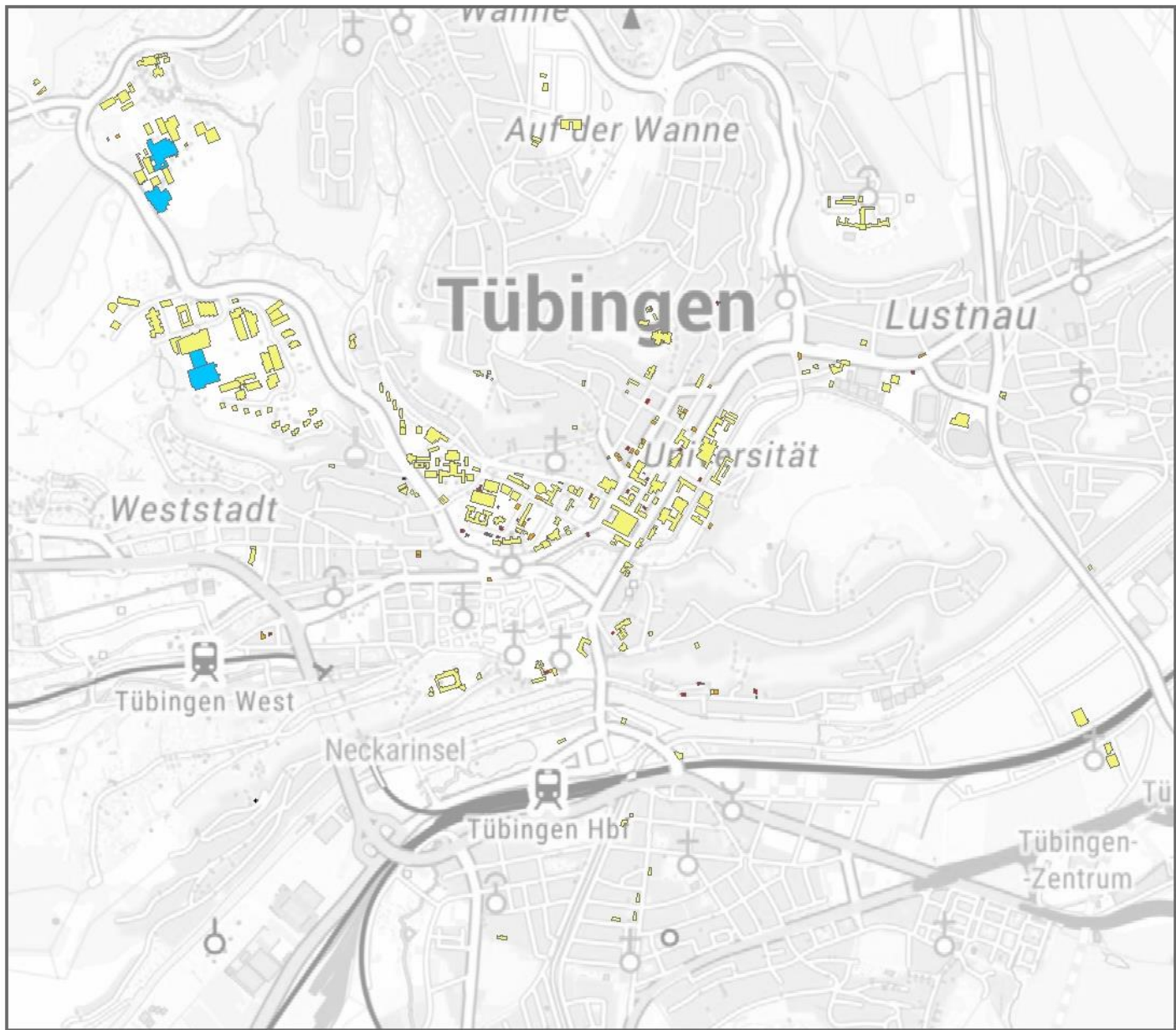
Legende

Erdwärme: Indikator 1b Heizlast kWh
MWh/Jahr

- keine Daten vorhanden (4)
- Klasse 1: sehr geringes Potenzial (0-500 MWh/a) (241)
- Klasse 2: niedriges Potenzial (500-1.000 MWh/a) (23)
- Klasse 3: durchschn. Potenzial (1.000-2.000 MWh/a) (15)
- Klasse 4: gutes Potenzial (2.000-2.500 MWh/a) (1)
- Klasse 5: sehr gutes Potenzial (2.500-3.120 MWh/a) (2)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter
Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 2a
Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh)
Erdwärme

Erläuterung
Indikator 2a: Flächenbewertung nach Preis pro Energieeinheit. Der Indikator gibt an, welche Gebäudegrundflächen in der Eigenproduktion von Erdwärme die geringsten Kosten pro kWh aufweisen. Ausgehend von den Gesamtkosten (Investitionskosten/Betriebskosten) und der Wärmemenge in 20 Jahren. Die Karte teilt die Gebäudegrundflächen in 5 Klassen (Equal Breaks) ein.

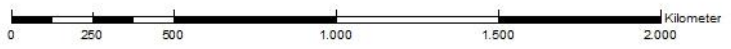
Legende

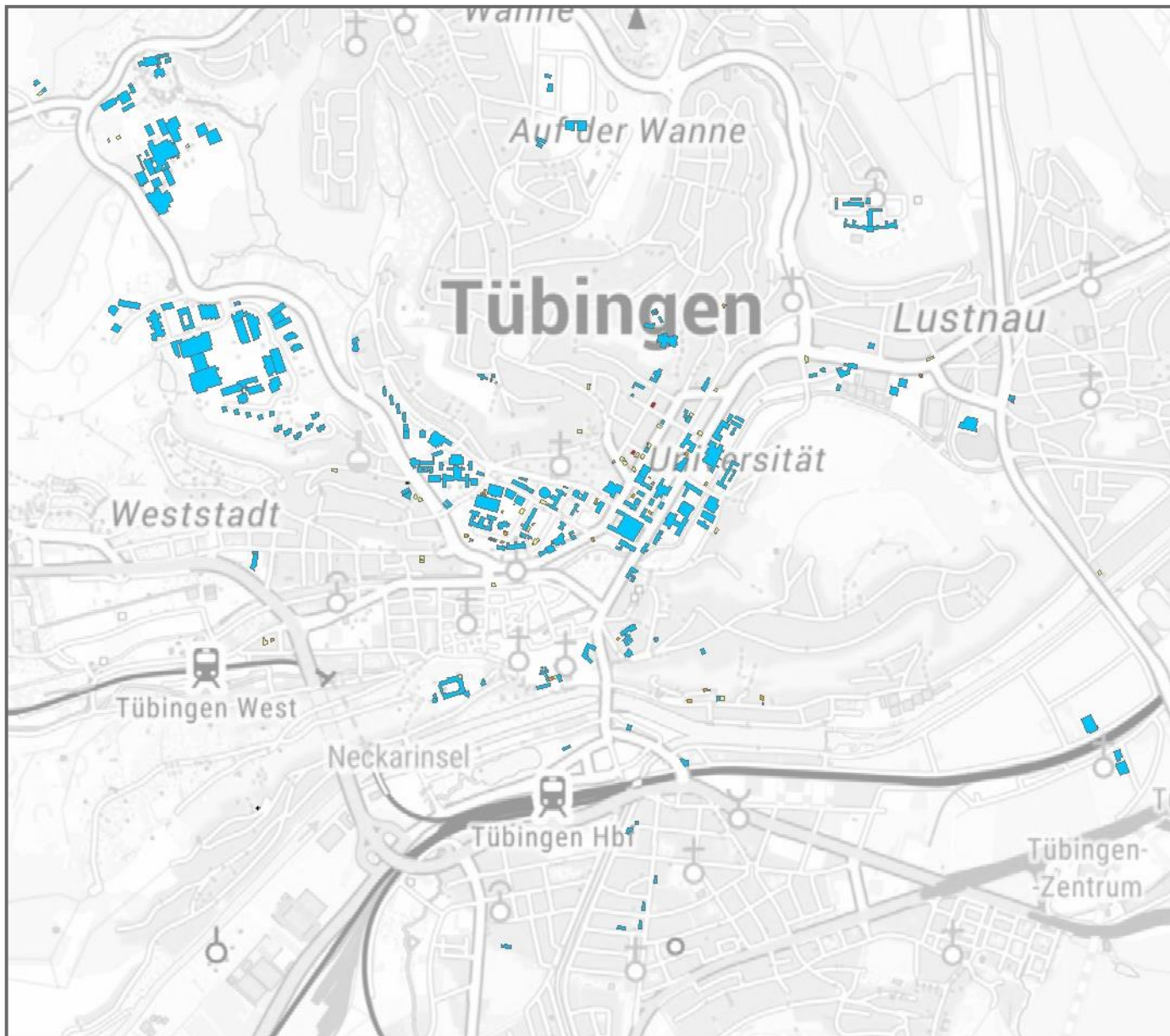
- Erdwärme: Indikator 2a Preis pro Energieeinheit
Euro/kWh auf 20 Jahre
- keine Daten vorhanden (4)
 - Klasse 1: Preis sehr gering (0-0,05 Euro/kWh) (0)
 - Klasse 2: Preis niedrig (0,05-0,10 Euro/kWh) (4)
 - Klasse 3: Preis durchschnittlich (0,10-0,15 Euro/kWh) (217)
 - Klasse 4: Preis erhöht (0,15-0,20 Euro/kWh) (29)
 - Klasse 5: Preis teuer (0,20-0,31 Euro/kWh) (32)

TopPlusOpen P50 Graustufen (0 bsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 2b
Preis pro Sondenmeter (Euro/m)
Erdwärme

Erläuterung

Indikator 2b: Flächenbewertung nach
Preis pro Sondenmeter der Erdwärmesonde
- in Euro/m

Der Indikator gibt an, welche Gebäudegrundflächen
in der Eigenproduktion von Erdwärme den geringsten
Sondenmeterpreis aufweisen. Ausgehend von den
Gesamtkosten (Investitions-/Baukosten+
Betriebskosten) und der Wärmemenge in 20 Jahren.
Die Karte teilt die Gebäudegrundflächen in
5 Klassen (Equal Breaks) ein.

Legende

Erdwärme: Indikator 2b Preis pro Sondenmeter

Euro/Sondenmeter

- keine Daten vorhanden (4)
- Klasse 1: Preis sehr gering (bis 200 €/m) (0)
- Klasse 2: Preis niedrig (bis 400 €/m) (214)
- Klasse 3: Preis durchschnittlich (bis 600 €/m) (36)
- Klasse 4: Preis erhöht (bis 800 €/m) (28)
- Klasse 5 : Preis teuer (bis max. 824 €/m) (4)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N

Projection: Transverse Mercator

Datum: WGS 1984

False Easting: 500.000,0000

False Northing: 0,0000

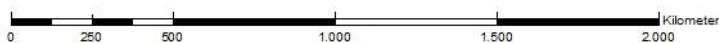
Central Meridian: 9,0000

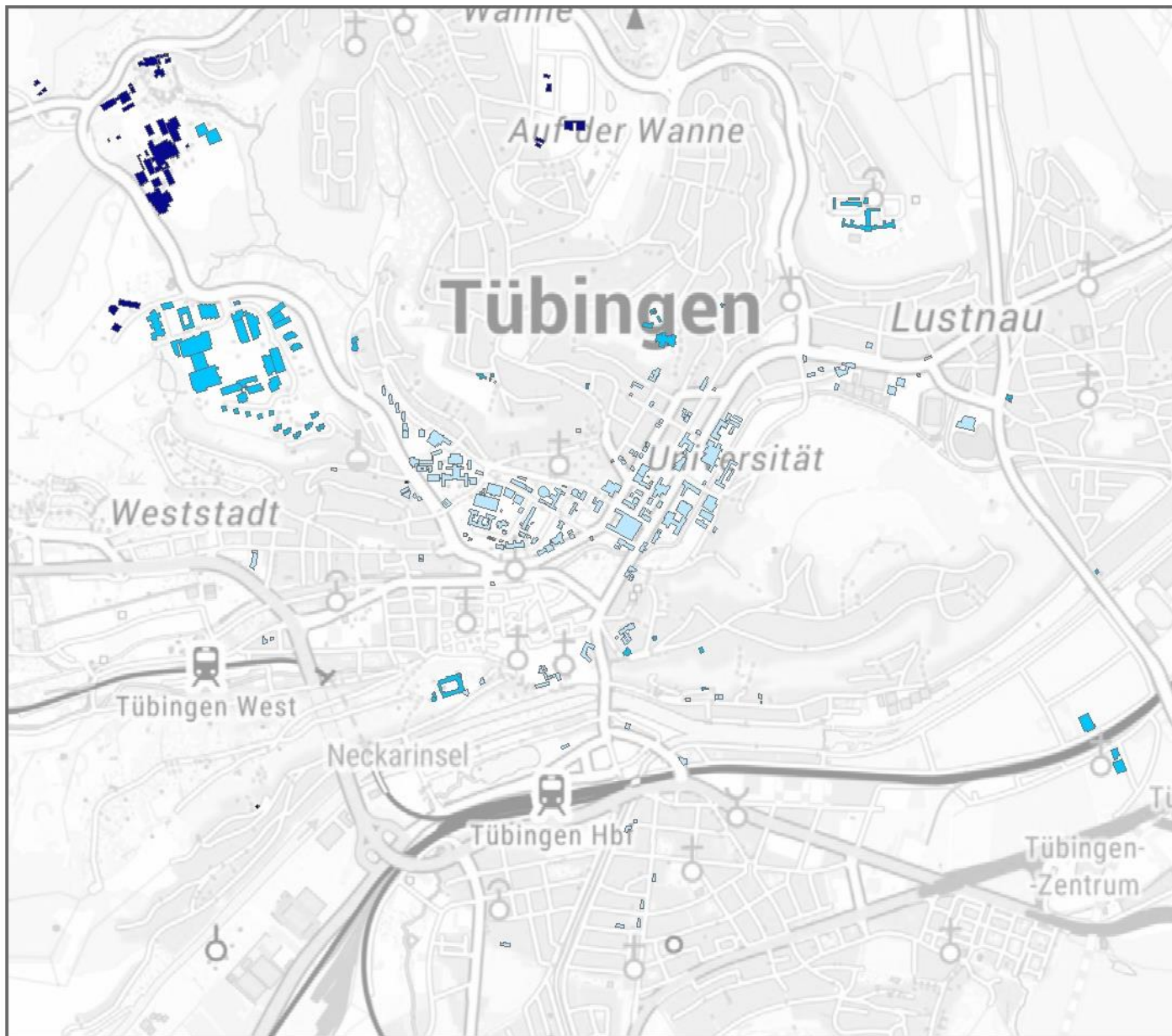
Scale Factor: 0,9996

Latitude Of Origin: 0,0000

Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 3a
CO₂ - Emissionen in CO₂ t/m²
Erdwärme

Erläuterung

Indikator 3a: Flächenbewertung nach
CO₂-Emissionen - in Tonnen CO₂ t/m² pro Jahr.

Der Indikator gibt den CO₂-Wert an, der für die
Erdwärme pro Gebäudegrundfläche steht.
Ausgehend von der berechneten Heizlast und
dem CO₂-Äquivalent für Erdwärme ergibt sich
der CO₂-Wert pro Gebäudegrundfläche.
Die Karte teilt die Gebäudegrundflächen in
5 Klassen ein.

Legende

Erdwärme: Indikator 3a CO₂/m²

CO₂ t/m²

- keine Daten vorhanden (4)
- Klasse 1: gering (bis 20 t CO₂/m²) (174)
- Klasse 2: durchschnittlich (bis 27 t CO₂/m²) (71)
- Klasse 3: hoch (bis 33 t CO₂/m²) (37)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N

Projection: Transverse Mercator

Datum: WGS 1984

False Easting: 500.000,0000

False Northing: 0,0000

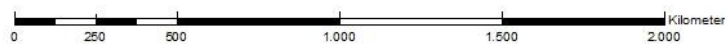
Central Meridian: 9,0000

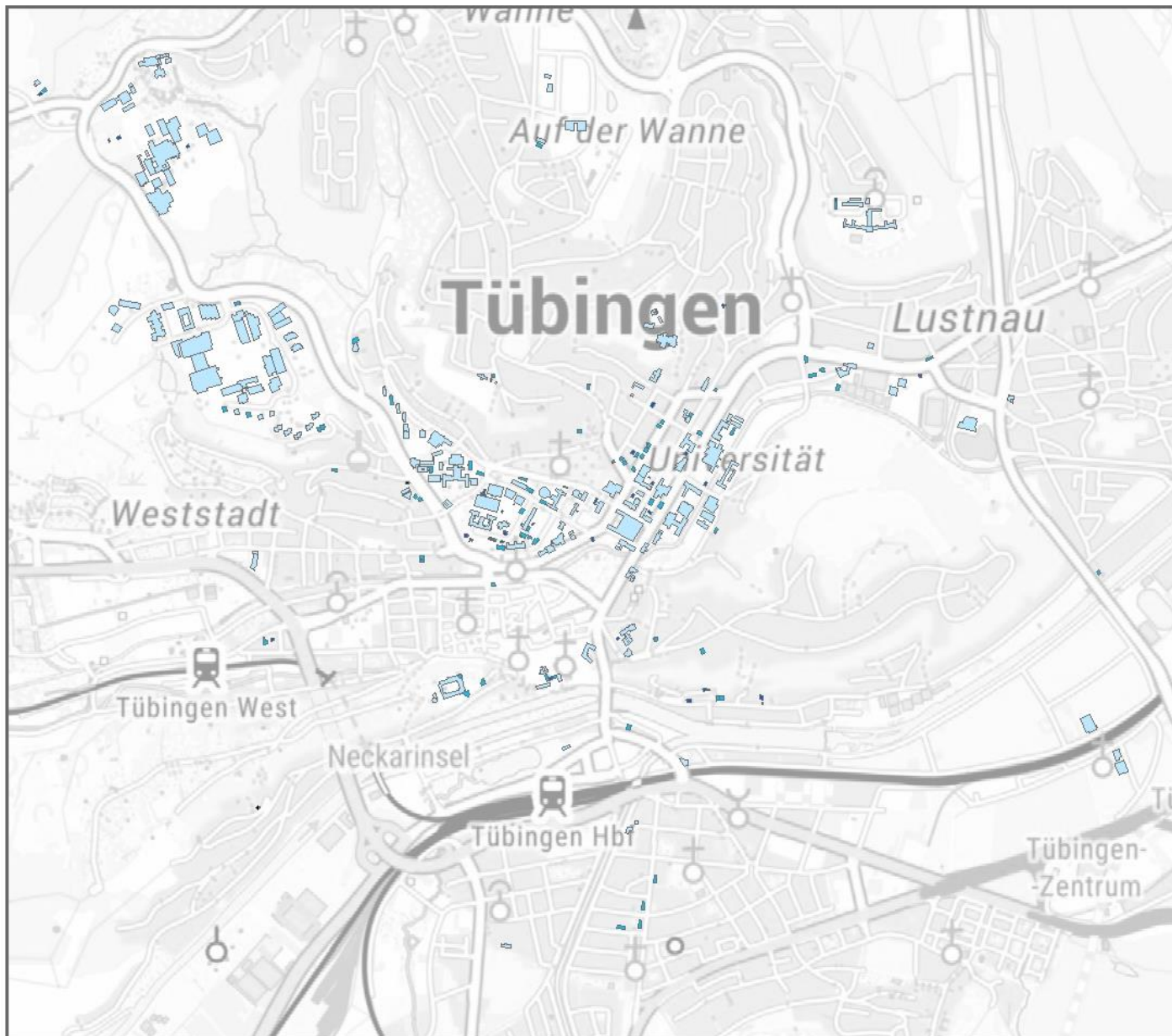
Scale Factor: 0,9996

Latitude Of Origin: 0,0000

Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Indikator 3b CO₂ - Abgabe pro Sondenmeter Erdwärme

Erläuterung

Indikator 3b: Flächenbewertung nach
CO₂-Abgabe in Euro pro Sondenmeter pro Jahr.

Der Indikator gibt den Euro-Wert der
CO₂-Emissionen an, der sich pro Sondenmeter
ergibt. Ausgehend vom berechneten CO₂-Wert
pro Gebäudegrundfläche pro Jahr ergibt sich ein
CO₂-Wert pro Sondenmeter, bei der Erdwärmegewinnung (abhängig von der Erdwärmemenge).
Die Karte teilt die Gebäudegrundflächen in
5 Klassen (Equal Breaks) ein.

Legende

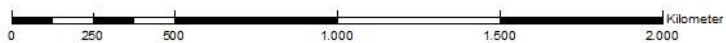
Erdwärme: Indikator 3b CO₂ /Sondenmeter

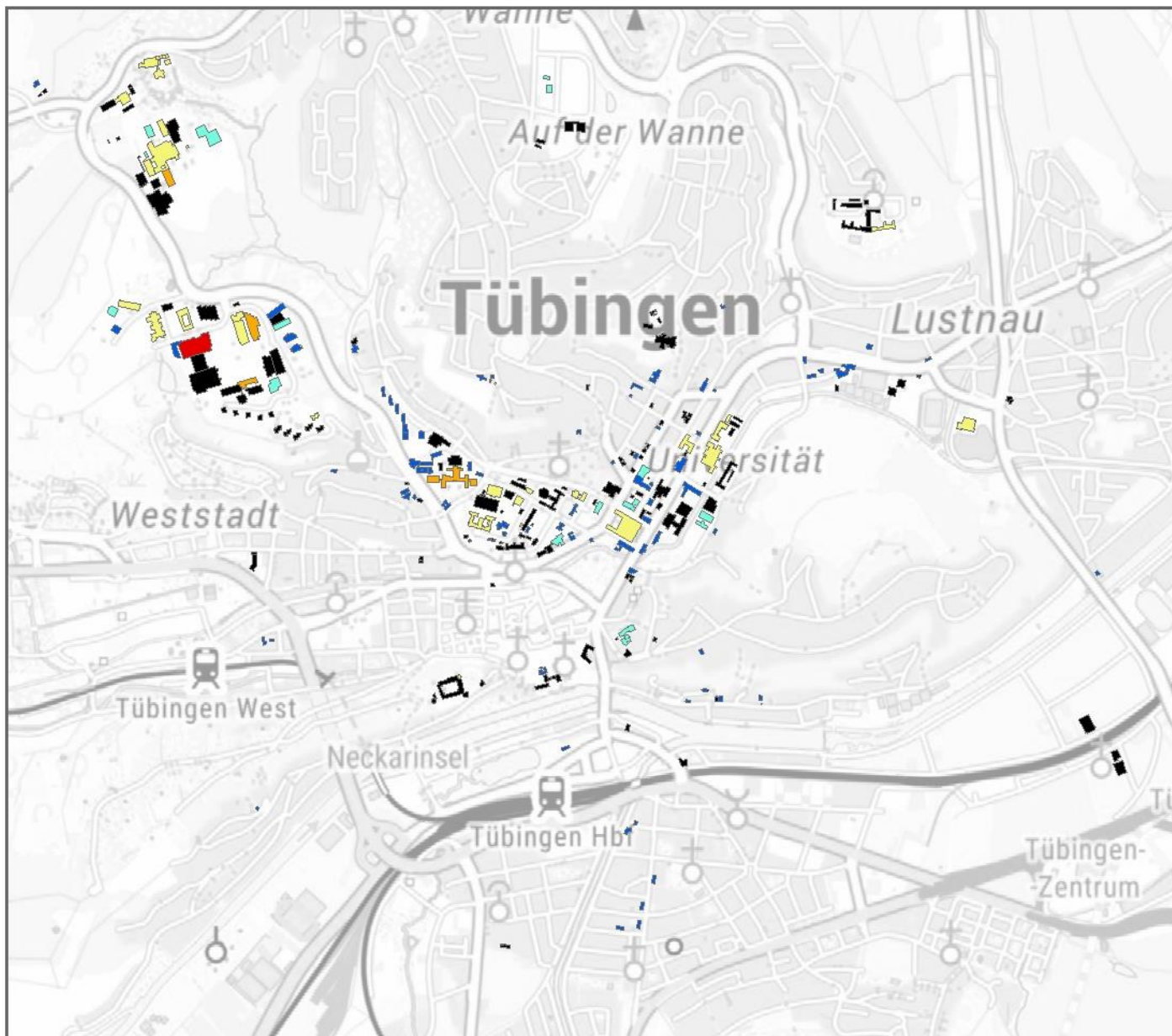
CO₂ t/m

- keine Daten vorhanden (4)
- Klasse 1: geringste (bis 0,03 t) (176)
- Klasse 2: moderte (bis 0,07 t) (69)
- Klasse 3: höchste (bis max. 0,12 t) (37)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Benötigte Heizlast zur Wärmebedarfsdeckung mit Erdwärme

Erläuterung

Diese Übersichtskarte stellt die erforderliche Heizlast pro Gebäudegrundfläche dar. Ausgehend vom Wärmeverbrauch (2015) wurde die Anlagenkonfiguration zur Wärmebedarfsdeckung berechnet. Die Karte zeigt die benötigte Heizlast in kWh pro Jahr und pro Gebäudegrundfläche an. Die Werte sind in 5 Klassen (Quantile) unterteilt an.

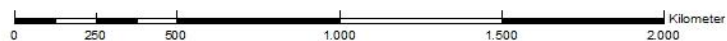
Wärmebedarfsdeckung

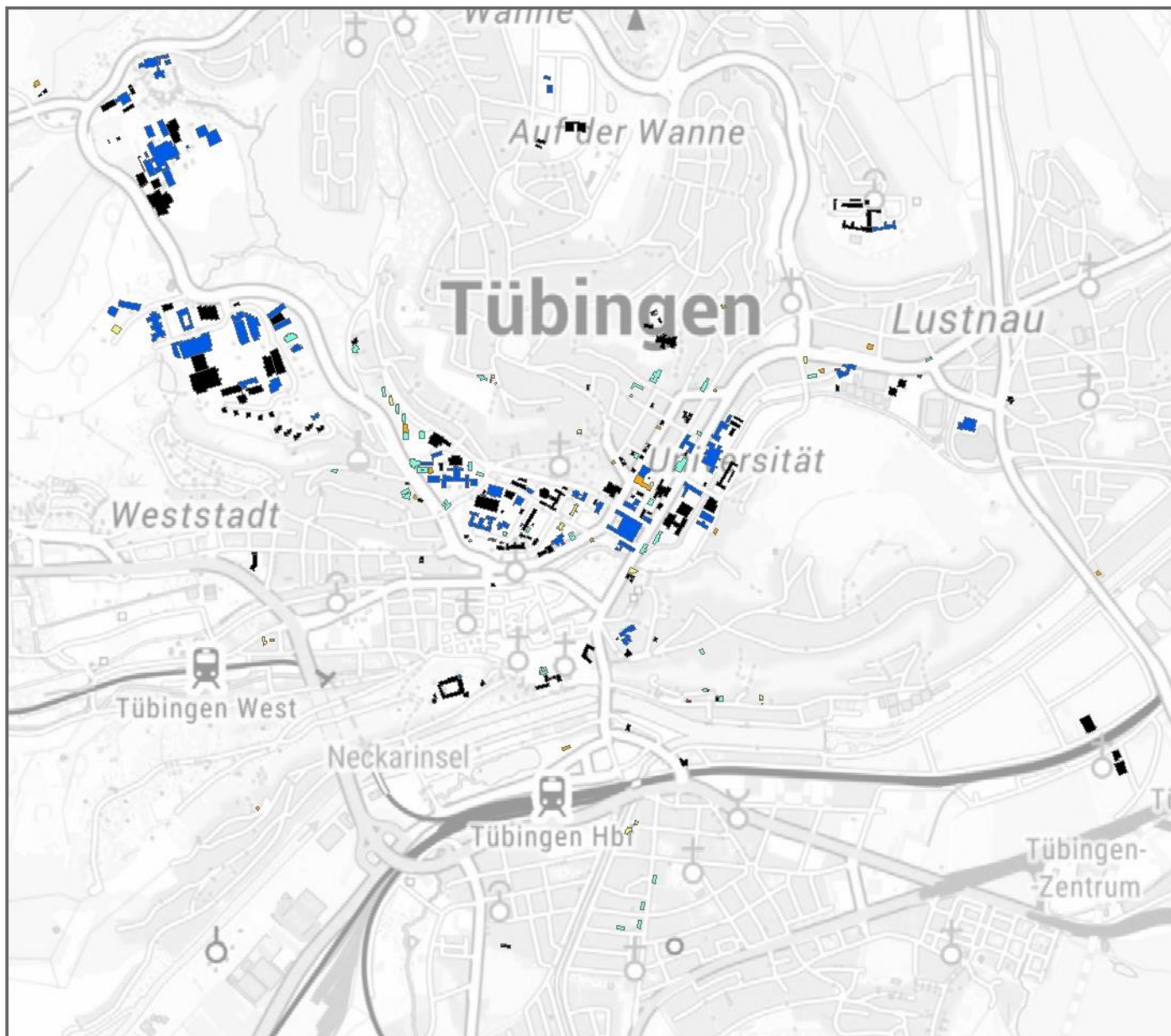
Erforderliche Heizlast in kWh/a

- keine Daten vorhanden (152)
- Klasse 1: sehr niedrig (bis 500 MWh/a)
- Klasse 2: gering (bis 1 GWh/a) (15)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 5 GWh/a)
- Klasse 4: hoch (bis 10 GWh/a) (5)
- Klasse 5: sehr hoch (bis max. 15,8 GWh/a)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Preis pro Energieeinheit
bei Wärmebedarfsdeckung
mit Erdwärme

Erläuterung

Diese Übersichtskarte stellt den Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh) auf, wenn die Wärmepumpen zur Wärmebedarfsdeckung ausgelegt sind.

Die Karte teilt die Gebäudegrundfläche in 5 Klassen ein. Dabei ist ein signifikanter Ausreißer dunkelrot. Für die schwarz markierten Standorte war keine Bewertung möglich.

Legende

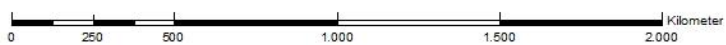
Wärmebedarfsdeckung mit Erdwärme

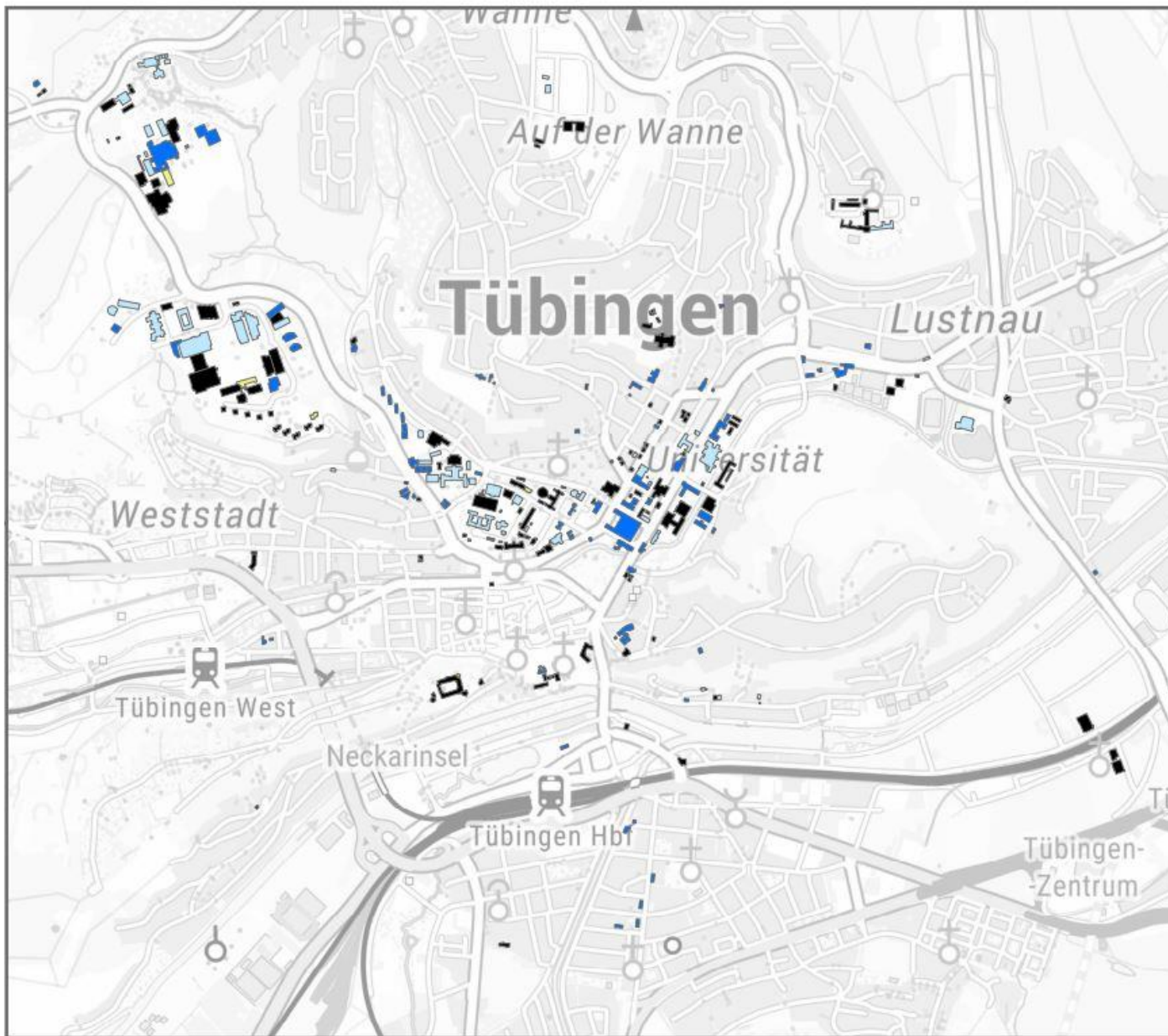
Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh)

- Keine Daten vorhanden (152)
- Klasse 1: sehr gering (bis 0,50 Euro/kWh) (62)
- Klasse 2: niedrig (bis 0,60 Euro/kWh) (41)
- Klasse 3: erhöht (bis 0,70 Euro/kWh) (13)
- Klasse 4: sehr erhöht (bis 10 Euro/kWh) (17)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 127 Euro/kWh) (1)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

CO₂-Emission der Erdwärme
bei Wärmebedarfsdeckung

Erläuterung

Diese Übersichtskarte zeigt den CO₂-Wert in kg bzw. Tonnen pro m² an, der sich aus dem Wärmebedarf ergibt.

Die Karte teilt die Gebäudegrundfläche in 5 Klassen. Dabei ist ein signifikanter Ausreißer dunkelrot. Für die schwarz markierten Standorte war keine Bewertung möglich.

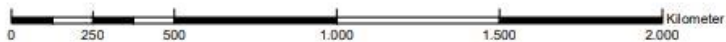
Wärmebedarfsdeckung: CO₂-

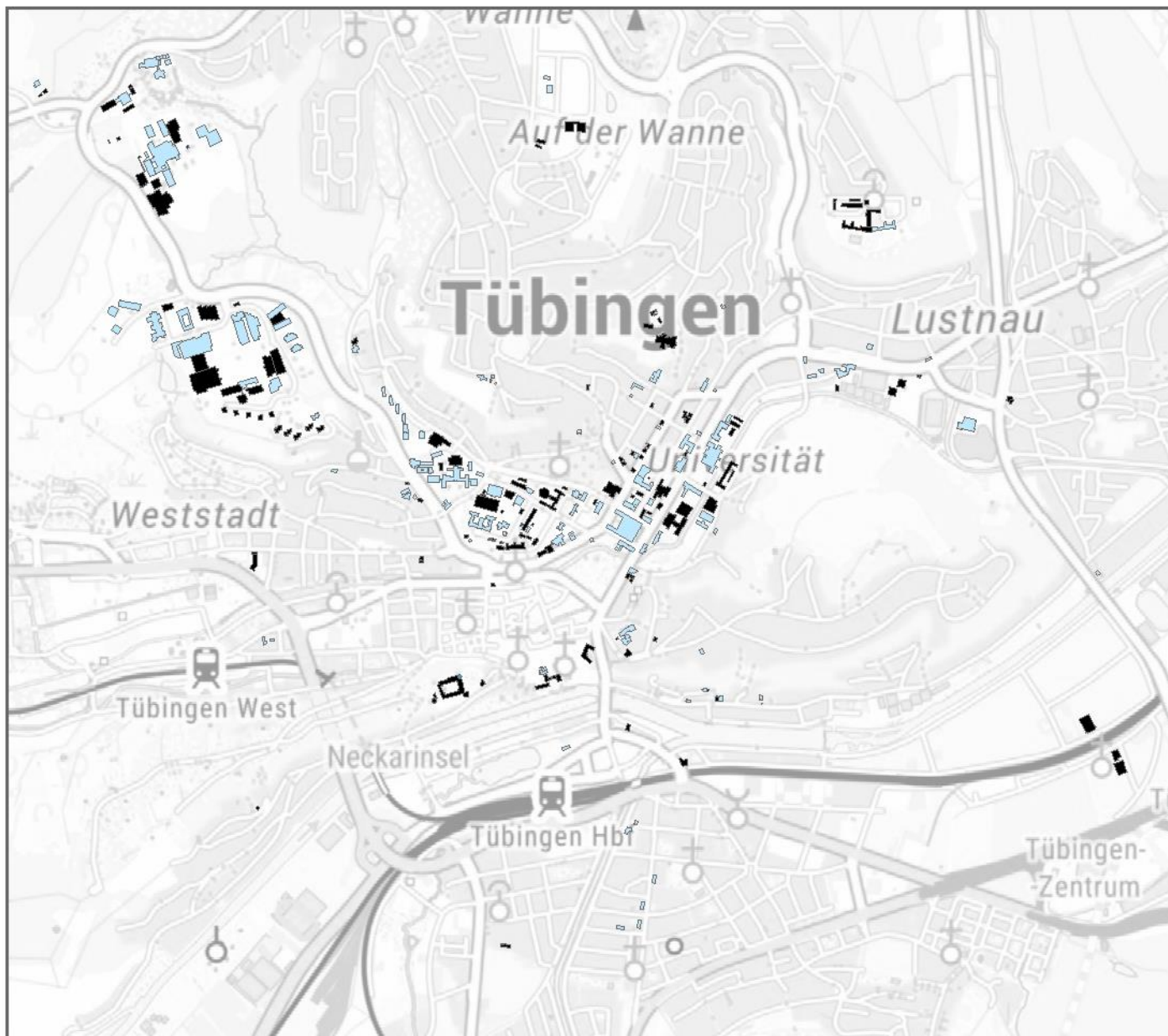
CO₂ kg/m²

- keine Bewertung möglich (153)
- Klasse 1: sehr gering (bis 50 kg/m²) (73)
- Klasse 2: niedrig (bis 250,00 kg/m²) (53)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 500 kg/m²) (4)
- Klasse 4: hoch (bis 1.000 kg/m²) (1)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 1.8 t/m²)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

CO₂-Emission der Erdwärme
bei Wärmebedarfsdeckung

Erläuterung

Diese Übersichtskarte zeigt den CO₂-Wert in kg bzw. Tonnen pro m² an, der sich aus dem Wärmebedarf ergibt.

Die Karte teilt die Gebäudegrundfläche in 5 Klassen. Dabei ist ein signifikanter Außreißer dunkelrot.

Für die schwarz markierten Standorte war keine Bewertung möglich.

Legende

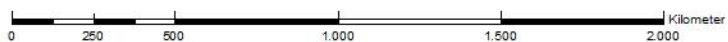
Wärmebedarfsdeckung: CO₂-Emission

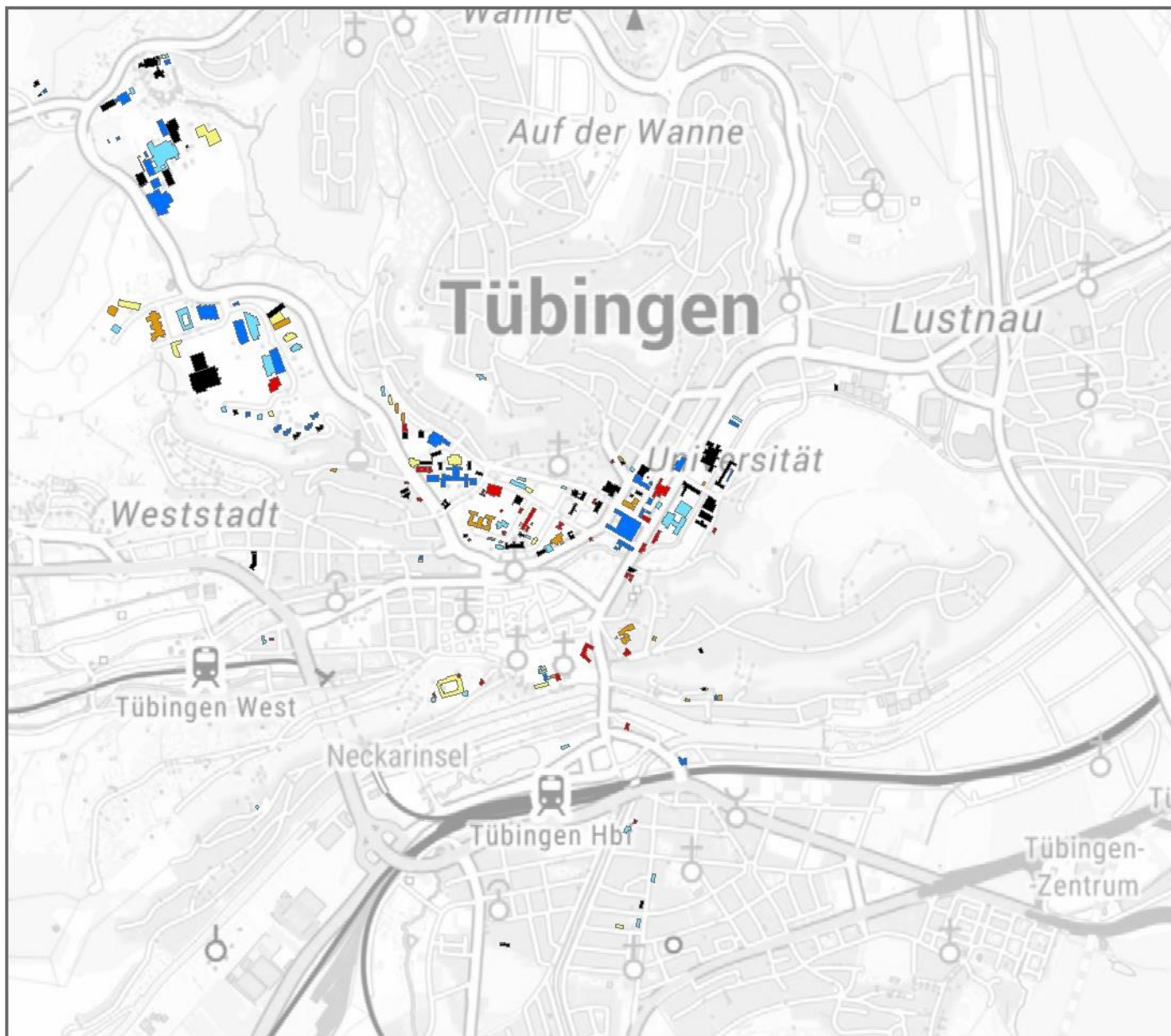
CO₂ kg/m²

- 0,00 (153)
- Klasse 1: sehr gering (bis 500 kg/m²) (130)
- Klasse 2: durchschnittlich (bis 1.000 kg/m²) (1)
- Klasse 3: höchste Werte (bis 1.000 kg-1.800 kg/m²) (2)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Wärmeverbrauch (2015)
(Fernwärme, Heizöl, Erdgas)

Erläuterung

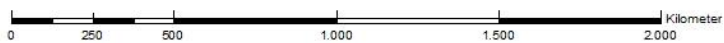
Diese Übersichtskarte stellt den Wärmeverbrauch in MWh/a pro Gebäudegrundfläche dar. Ausgehend vom Wärmeverbrauch (2015) wurden die Standorte in 5 Klassen unterteilt. Die Standorte mit Verbrauchswerten über 1.000 MWh pro Jahr sind dunkelrot markiert. Für die schwarzen Standorte (Polygone) waren keine Daten vorhanden.

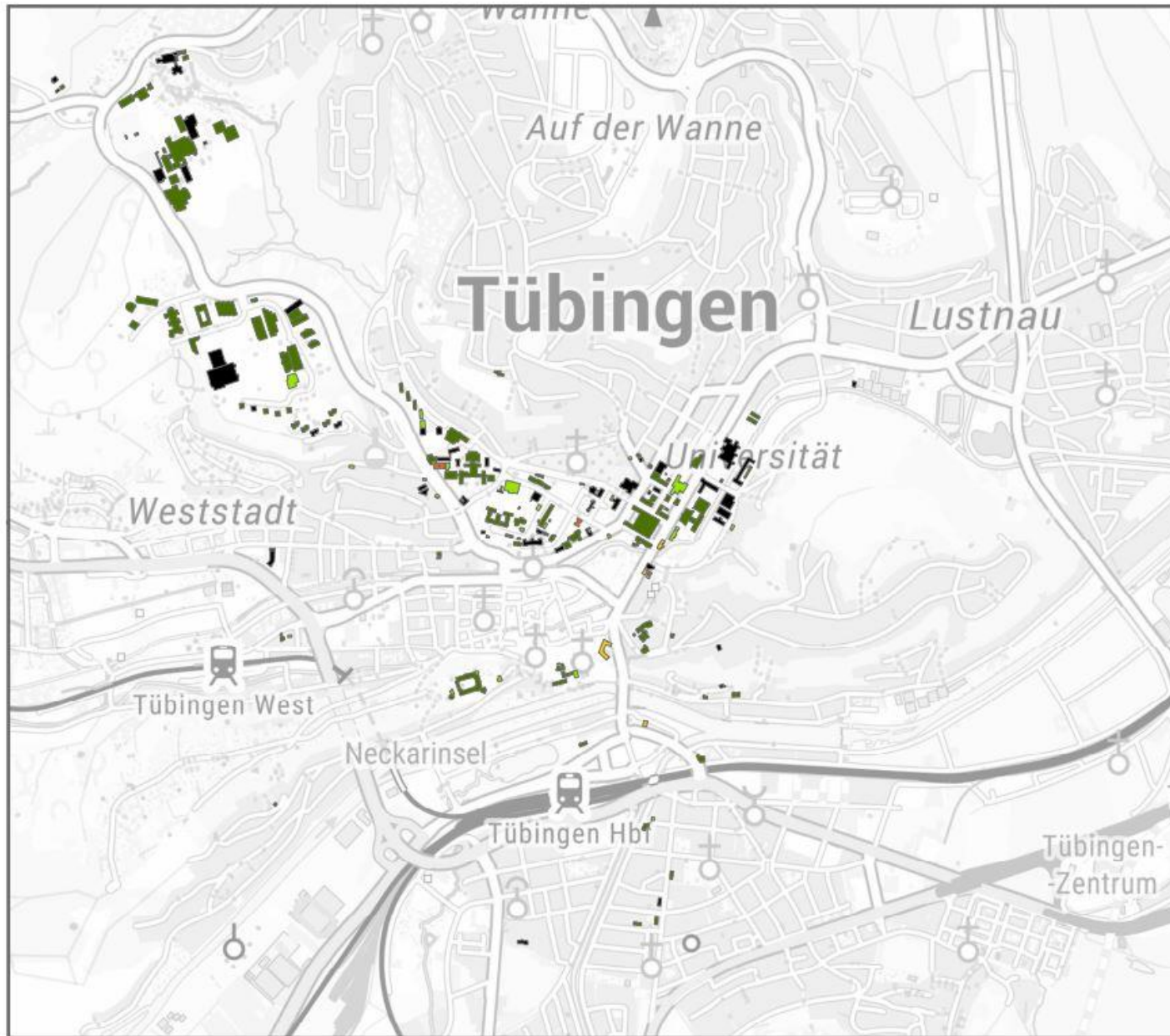
Wärmeverbrauch: Indikator
in MWh/a

- keine Daten vorhanden
- Klasse 1: sehr niedrig (bis 100 MWh/a)
- Klasse 2: gering (bis 200 MWh/a)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 500 MWh/a)
- Klasse 4: hoch (bis 1.000 MWh/a)
- Klasse 5: sehr hoch (bis 1.750 MWh/a)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

CO2-Emissionen des Wärmeverbrauchs (2015)

Erläuterung

Diese Übersichtskarte zeigt die CO2-Emissionen des Wärmeverbrauchs pro Jahr und Standort. Die Gesamtwerte der CO2-Emissionen bestehen aus dem Energiemix pro Standort. Ausgehend vom Wärmeverbrauch (2015) sind die CO2-Werte für Fernwärme, Erdgas und Heizöl zusammengefasst und in 5 Klassen unterteilt. Die Standorte mit CO2-Emissionen über 500 t pro Jahr sind orange markiert. Für die schwarzen Standorte (Polygone) waren keine Daten vorhanden.

Legende

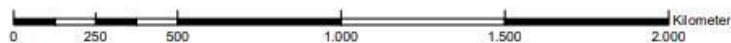
CO2-Emission pro Standort

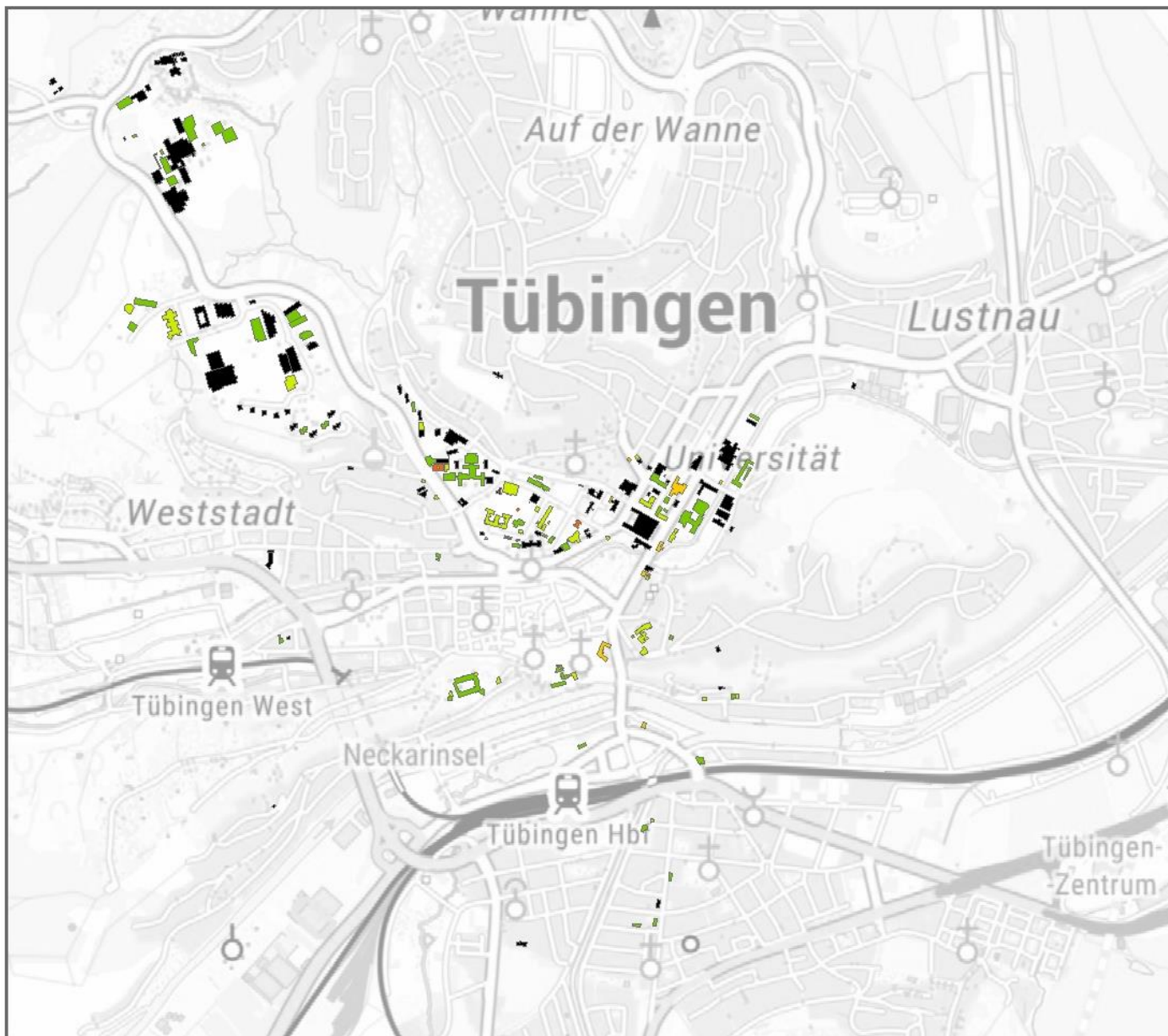
CO2 Tonnen pro Jahr

- keine Daten vorhanden (54)
- Klasse 1: sehr gering (bis 100 t) (113)
- Klasse 2: niedrig (bis 250 t) (23)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 500 t) (9)
- Klasse 4: hoch (bis 750 t) (4)
- Klasse 5: Ausreißer (1.594 t)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

**Gesamtkosten für die
Wärmeversorgung (2015)
auf 20 Jahre**

Erläuterung

Diese Übersichtskarte stellt die Energiekosten für Wärme für 20 Jahre dar. Ausgehend vom Wärmeverbrauch (2015) sind die Energiekosten für Fernwärme, Erdgas und Heizöl auf 20 Jahre hochgerechnet und in 5 Klassen unterteilt.

Standorte mit hohem Wärmeverbrauch sind dunkelrot markiert. Für die schwarzen Standorte (Polygone) waren keine Daten vorhanden.

Legende

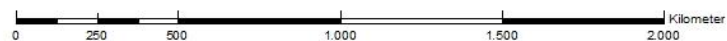
Verbrauch: Wärmekosten auf 20 Jahre

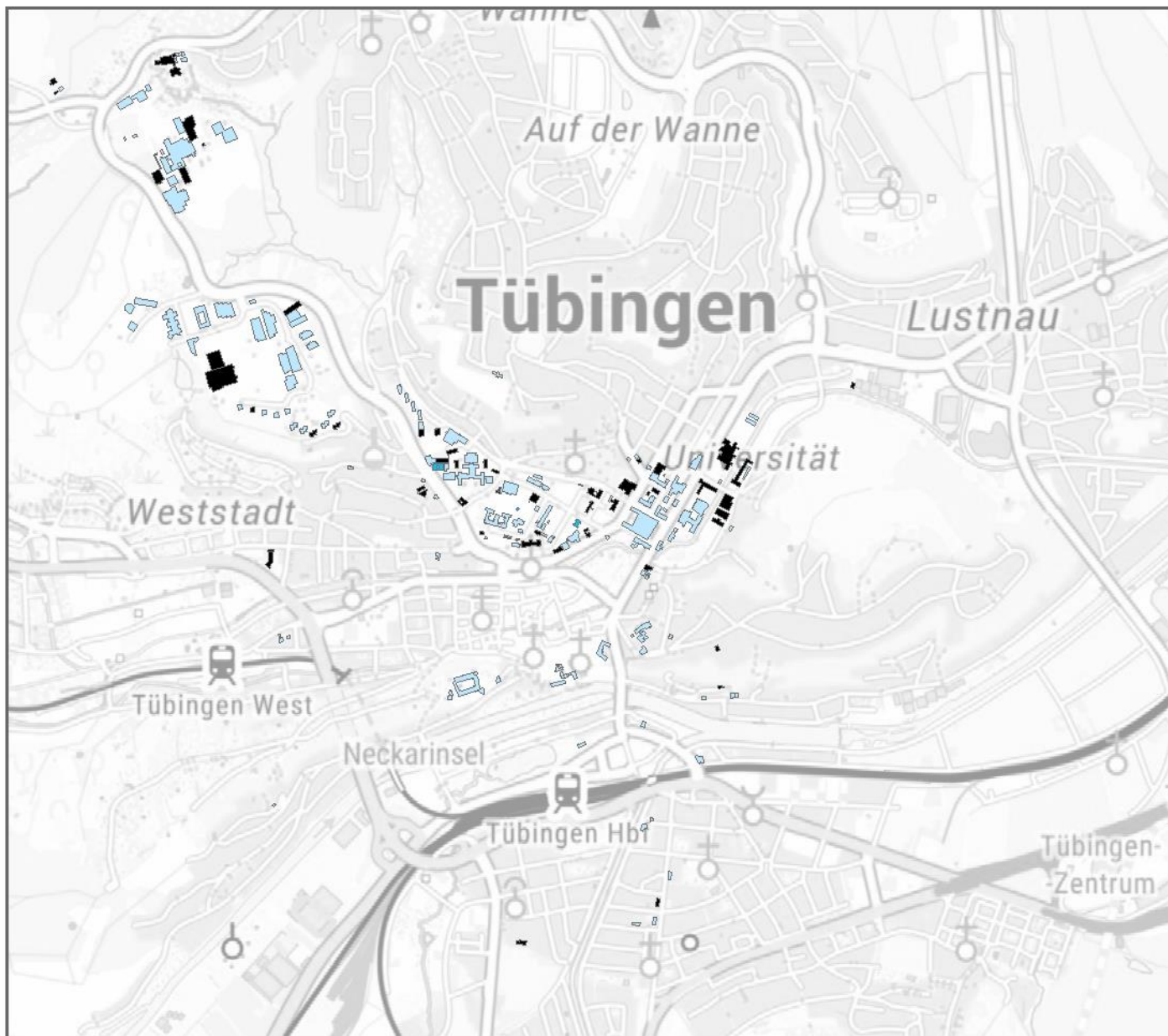
Euro pro Standort

- keine Daten vorhanden (93)
- Klasse 1: sehr niedrig (bis 50.000 Euro) (63)
- Klasse 2: gering (bis 250.000 Euro) (35)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 500.000 Euro) (8)
- Klasse 4: hoch (bis 1 Mio. Euro) (4)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 1.6 Mio Euro) (1)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

CO2-Emissionen des Wärmeverbrauchs

Erläuterung

Diese Übersichtskarte zeigt die CO2-Emissionen des Wärmeverbrauchs pro Jahr und Standort. Die Gesamtwerte der CO2-Emissionen bestehen aus dem Energiemix pro Standort. Ausgehend vom Wärmeverbrauch (2015) sind die CO2-Werte für Fernwärme, Erdgas und Heizöl zusammengefasst und in 5 Klassen unterteilt. Die Standorte mit CO2-Emissionen über 500 t pro Jahr sind orange markiert. Für die schwarzen Standorte (Polygone) waren keine Daten vorhanden.

Legende

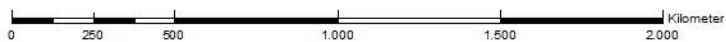
CO2-Emission pro Standort Fehler?

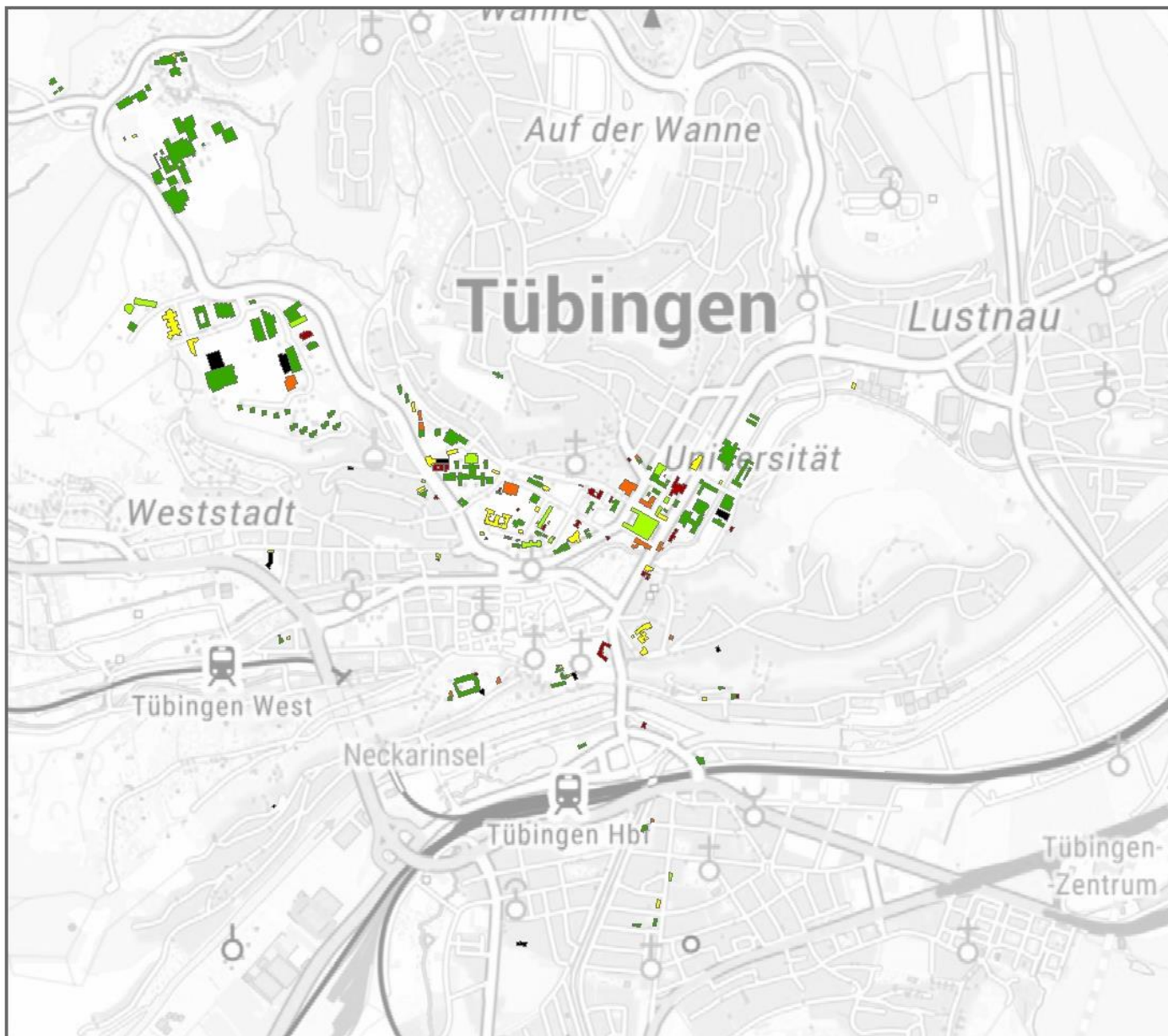
CO2 Tonnen pro Jahr

- keine Daten vorhanden (54)
- Klasse 1: sehr gering (bis 500 t) (145)
- Klasse 2: durchschnittlich (bis 1.000 t) (4)
- Klasse 3: hoch (bis 1.594 t) (1)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

Stromverbrauch (2015)
(100% Ökostrom)

Erläuterung

Diese Übersichtskarte stellt den Stromverbrauch in MWh/a pro Gebäudegrundfläche dar. Ausgehend vom Stromverbrauch (2015) wurden die Standorte in 5 Klassen unterteilt. Die Standorte mit Verbrauchswerten über 1.000 MWh pro Jahr sind dunkelrot markiert. Für die schwarzen Standorte (Polygone) waren keine Daten vorhanden.

Legende

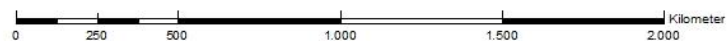
Verbrauch: Stromverbrauch pro Standort

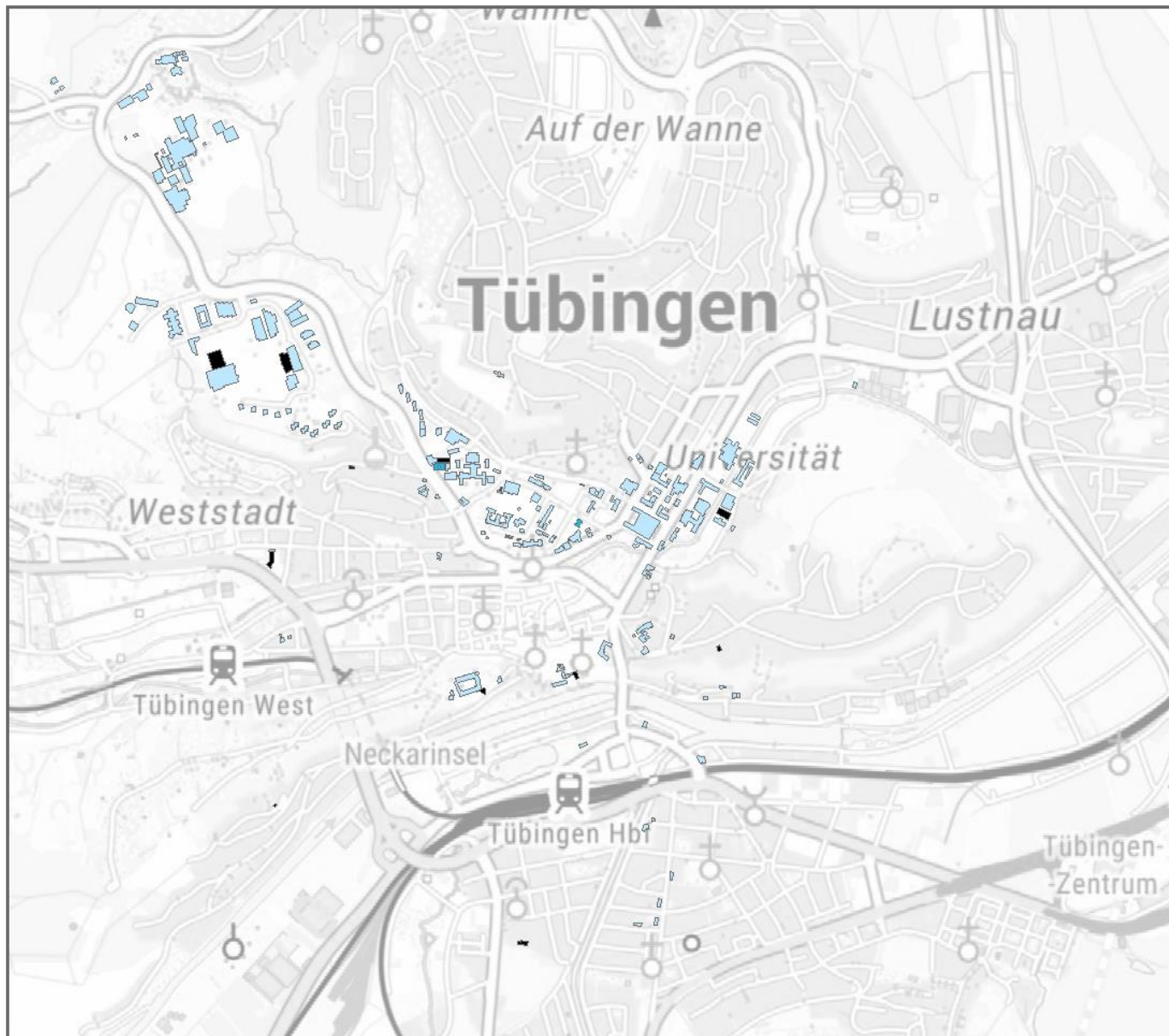
Jahresverbrauch in MWh/a

- keine Daten vorhanden (11)
- Klasse 1: sehr niedrig (bis 100 MWh/a) (106)
- Klasse 2: gering (bis 200 MWh/a) (19)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 500 MWh/a) (29)
- Klasse 4: hoch (bis 1.000 MWh/a) (13)
- Klasse 5: sehr hoch (bis 1.483 MWh/a) (26)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

CO2-Emissionen des
Stromverbrauchs (2015)

Erläuterung

Diese Übersichtskarte zeigt die CO2-Emissionen des Stromverbrauchs pro Jahr und Standort. Die Gesamtwerte der CO2-Emissionen stehen für 100% Ökostrom pro Standort. Ausgehend vom Stromverbrauch (2015) sind die CO2-Werte in 5 Klassen unterteilt. Die Standorte mit CO2-Emissionen über 50 t pro Jahr sind dunkelrot (Ausreißer) markiert. Für die schwarzen Standorte (Polygone) waren keine Daten vorhanden.

Legende

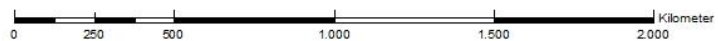
Stromverbrauch CO2-Emission pro Standort

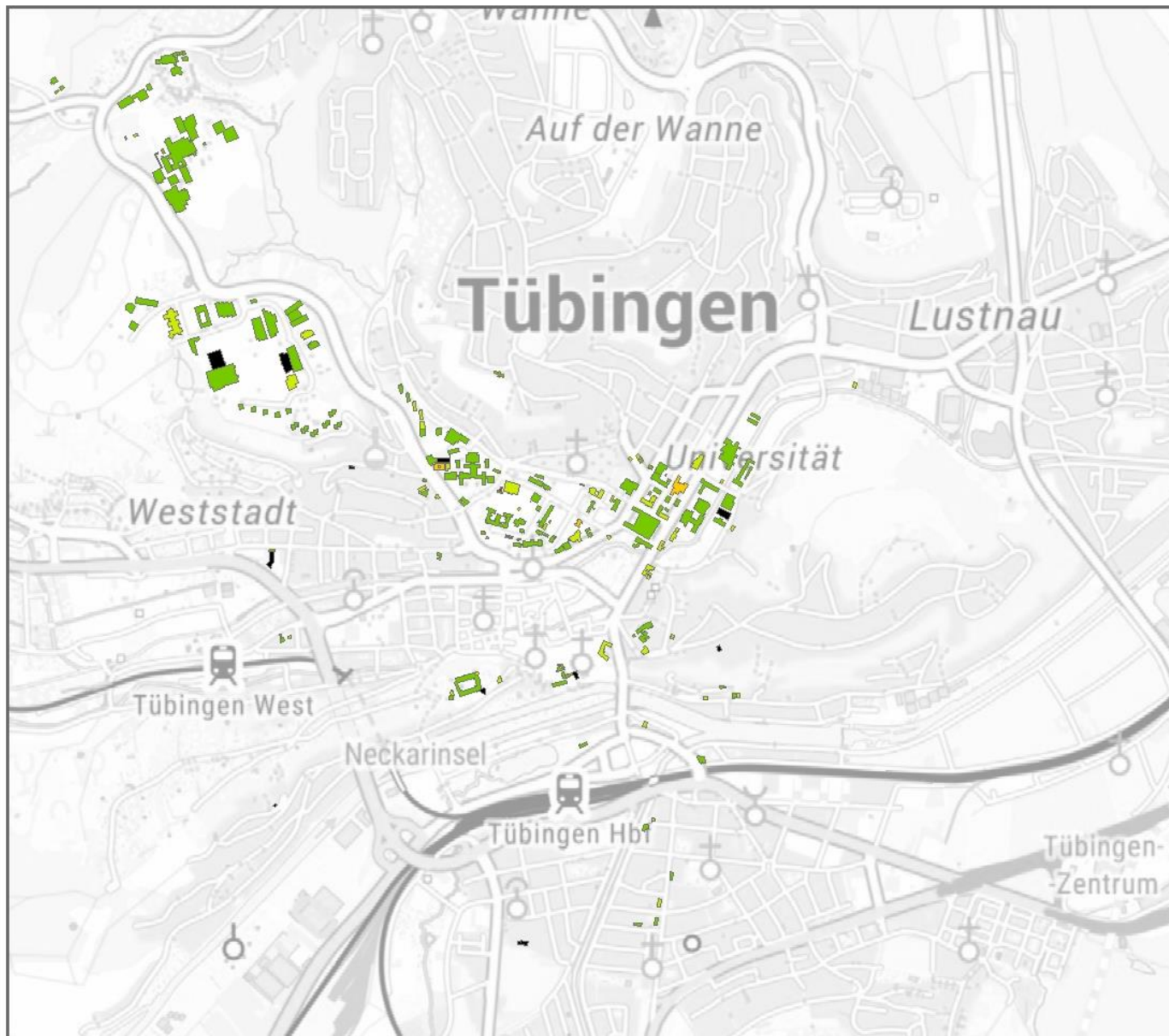
CO2 Tonnen pro Jahr

- keine Daten vorhanden (11)
- Klasse 1: sehr gering (bis 200 t) (190)
- Klasse 2: durchschnittlich (bis 400 t) (2)
- Klasse 3: hoch und Ausreißer (594 t)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

**Gesamtkosten für die
Stromversorgung (2015)
auf 20 Jahre**

Erläuterung

Diese Übersichtskarte stellt die Energiekosten für Strom für 20 Jahre dar. Ausgehend vom Stromverbrauch (2015) sind die Energiekosten für Ökostrom auf 20 Jahre hochgerechnet und in 5 Klassen unterteilt.

Überwiegend werden die Gesamtkosten unter 20 Mio. Euro bleiben (für 20 Jahre), wenn die Energiepreise NICHT steigen. Ein Ausreißer (dunkelrot markiert) wird in 20 Jahren Gesamtkosten von 40,17 Mio. Euro verursachen. Für die schwarzen Standorte (Polygone) waren keine Daten vorhanden.

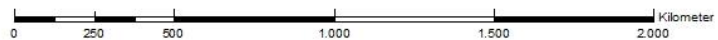
Legende

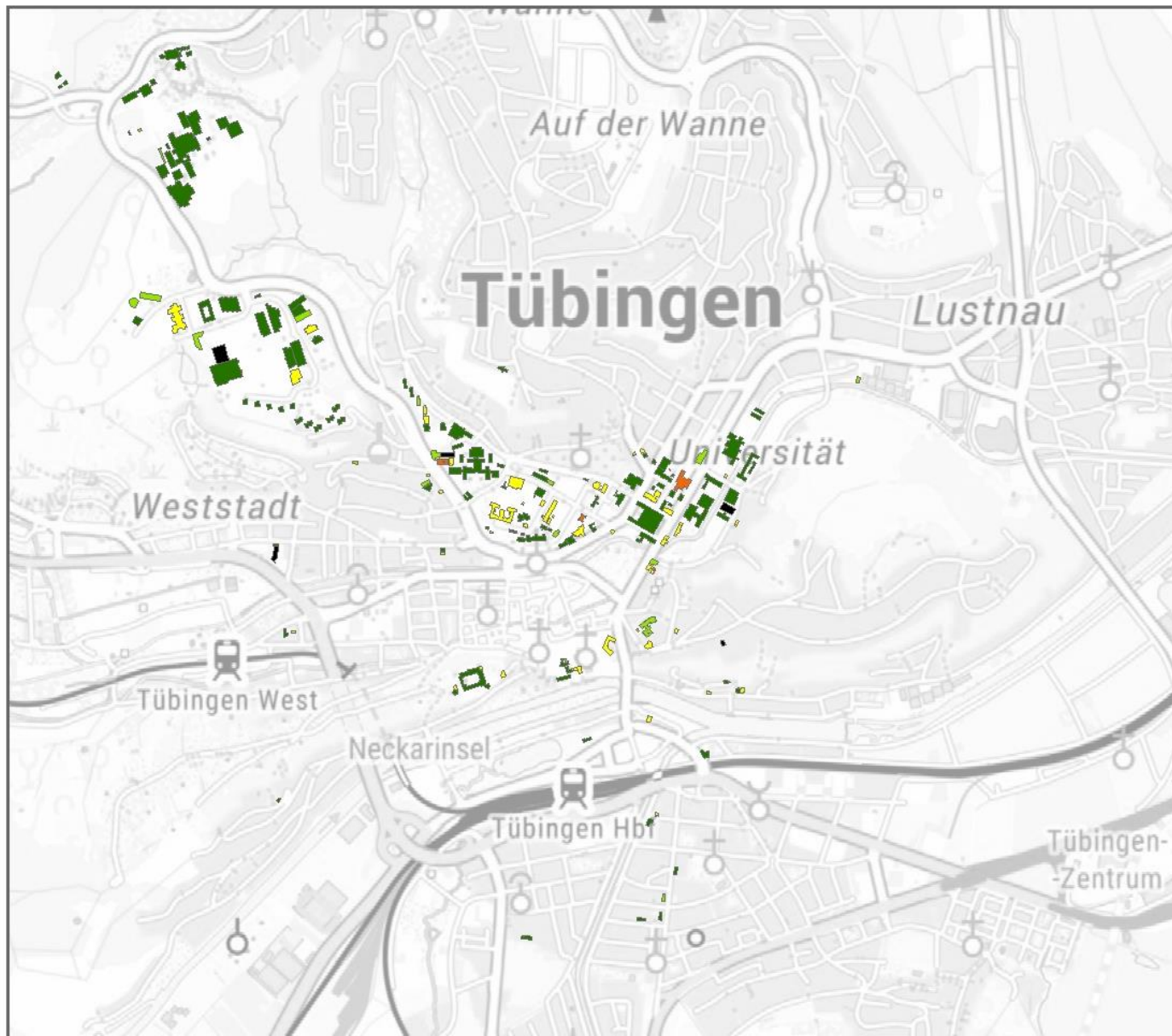
Verbrauch: Indikator Stromkosten auf 20 Jahre
Euro pro Standort

- keine Daten vorhanden (11)
- Klasse 1: sehr niedrig (bis 1 Mio. Euro) (140)
- Klasse 2: gering (bis 10 Mio. Euro) (49)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 20 Mio. Euro) (3)
- Klasse 4: hoch (bis 30 Mio. Euro) (0)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 40,17 Mio Euro) (1)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

**Gesamtkosten (2015)
für Strom und Wärme
pro Standort**

Erläuterung

Diese Übersichtskarte zeigt die Gesamtkosten des Energieverbrauchs in Strom und Wärme.

Ausgehend von den Energiekosten (2015) sind die Standorte in 5 Klassen unterteilt. Die Standorte mit Gesamtkosten über 1 Mio. Euro sind gelb markiert. Ein Ausreißer ist dunkelrot markiert. Für die schwarzen Standorte (Polygone) waren keine Daten vorhanden.

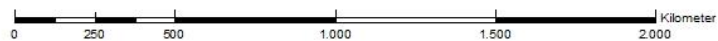
Legende

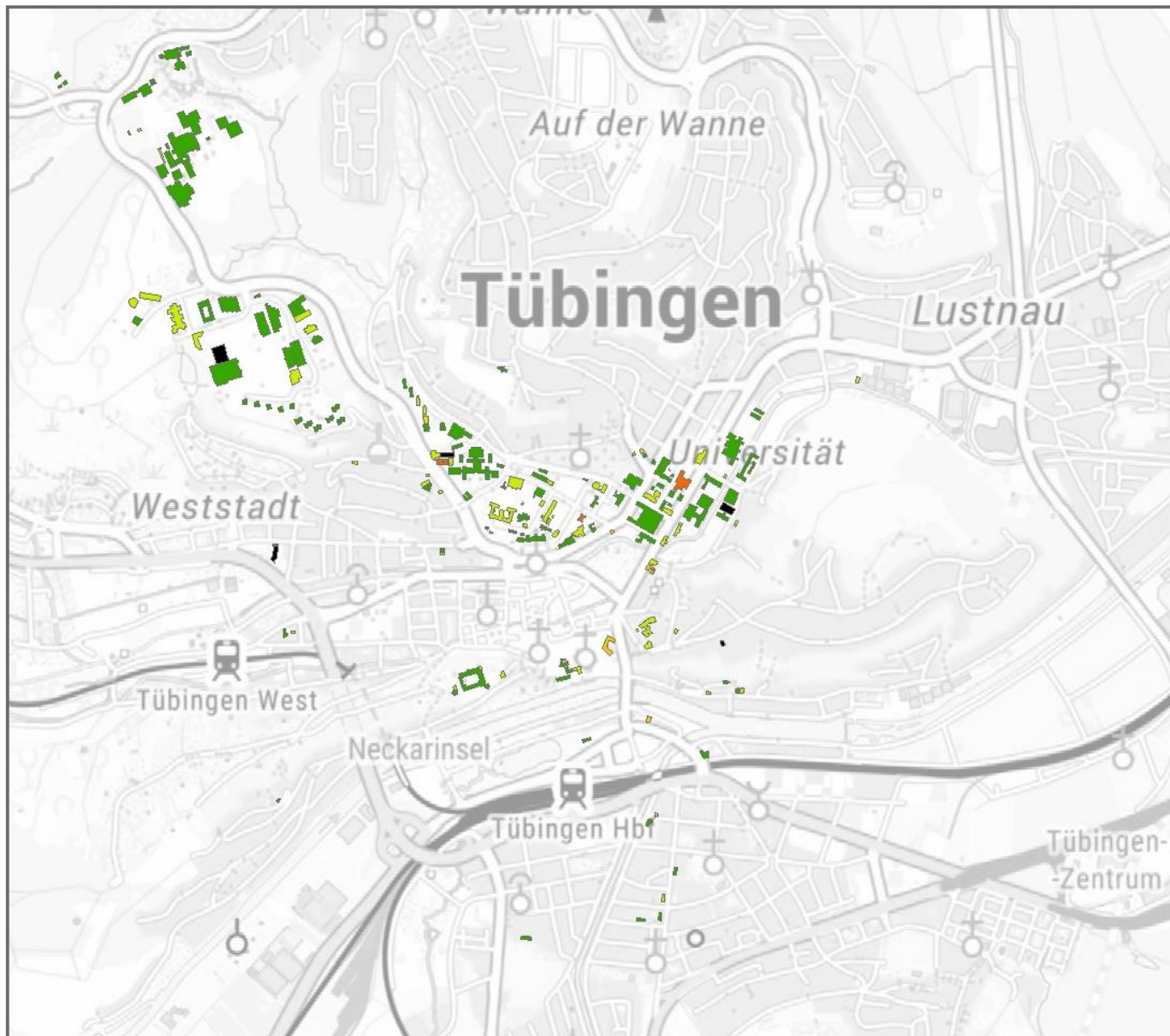
Verbrauch: Gesamtkosten pro Jahr
Euro pro Standort

- keine Daten vorhanden (5)
- Klasse 1: Kosten sehr niedrig (bis 50.000 €) (126)
- Klasse 2: Kosten gering (bis 100.000 €) (20)
- Klasse 3: Kosten durchschnittlich (bis 1 Mio. Euro) (48)
- Klasse 4: Kosten hoch (3 Mio. €) (4)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 3,5 Mio. €) (1)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Übersichtskarte

Untersuchungsgebiet - Ausschnitt -
Universität Tübingen und Universitätsklinikum

**Gesamtkosten (2015) auf 20 Jahre
für Strom und Wärme
pro Standort**

Erläuterung

Diese Übersichtskarte zeigt die Gesamtkosten auf 20 Jahre des Energieverbrauchs bei Strom und Wärme.

Ausgehend von den Energiekosten (2015) sind die Standorte in 5 Klassen unterteilt. Die Standorte mit Gesamtkosten über 20 Mio. Euro sind gelb markiert. Ein Ausreißer ist dunkelrot markiert. Für die schwarzen Standorte (Polygone) waren keine Daten vorhanden.

Legende

Verbrauch: Indikator Gesamtkosten auf 20 Jahre
Euro pro Standort

- keine Daten vorhanden (5)
- Klasse 1: Kosten sehr niedrig (bis 1 Mio. €) (126)
- Klasse 2: Kosten gering (bis 10 Mio. €) (59)
- Klasse 3: Kosten durchschnittlich (bis 20 Mio. €) (9)
- Klasse 4: Kosten hoch (50 Mio. €) (4)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 72 Mio. €) (1)

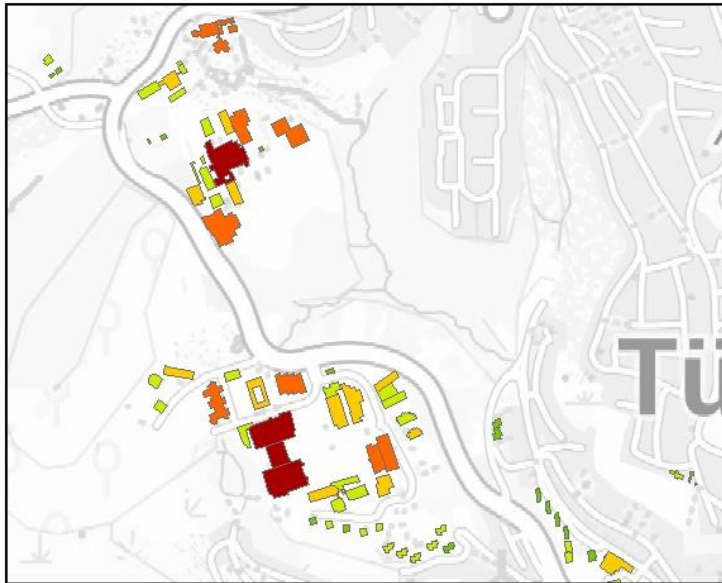
TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022



0 250 500 1.000 1.500 2.000 Kilometer

Anhang Ergebniskarten
Kartenblatt 23



Erdwärme Potenzial in kWh/a

Legende

Erdwärme: Potenzial

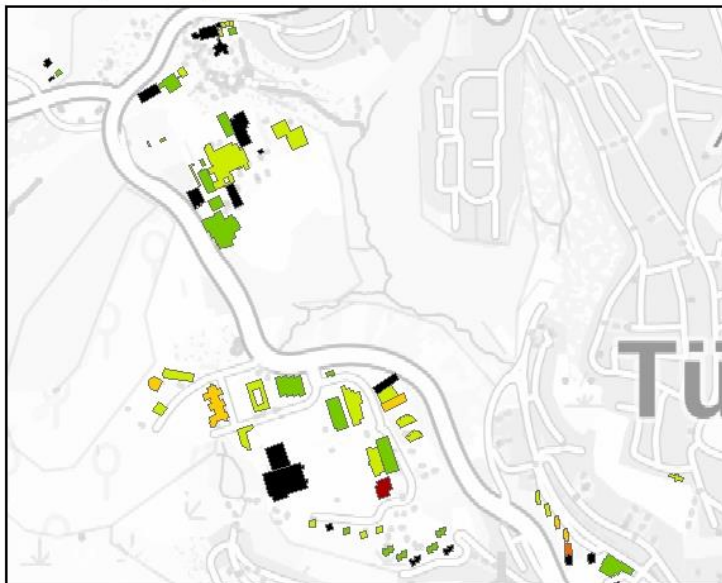
MWh/Jahr

- keine Daten vorhanden (1)
- Klasse 1: sehr niedrig (bis 100 MWh/a) (17)
- Klasse 2: gering (bis 500 MWh/a) (33)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 1.000 MWh/a) (13)
- Klasse 4: hoch (bis 2.000 MWh/a) (14)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 3.100 MWh/a) (4)

Erläuterung

Diese Vergleichskarte zeigt das Erdwärmepotenzial in MWh/a. Die Werte sind in 5 Klassen unterteilt. Einzelne Standorte weisen überdurchschnittlich hohe Potenzialwerte auf (Dunkelrot = >3.100 MWh/a).

0 0,25 0,5 1 Kilometer



Wärmeverbrauch in kWh/a

Legende

Wärmeverbrauch

MWh/Jahr

- keine Daten vorhanden (18)
- Klasse 1: sehr niedrig (bis 100 MWh/a) (19)
- Klasse 2: gering (bis 500 MWh/a) (24)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 1.000 MWh/a) (6)
- Klasse 4: hoch (bis 2.000 MWh/a) (1)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 17.500 MWh/a) (1)

Erläuterung

Die Vergleichskarte zeigt die gebäudespezifischen Verbrauchswerte (2015). Die Werte sind in den selben 5 Klassen unterteilt und weisen stellenweise im Vergleich eine niedrigere Verbrauchsklasse auf als beim Potenzial.

0 0,25 0,5 1 Kilometer

Vergleichskarten

Kartenausschnitt Campus Morgenstelle und Universitätsklinikum Schnarrenberg

Anmerkung

Die Neubauten und Fertigstellungen von Gebäuden nach dem Jahr 2015 sind nicht berücksichtigt.

Der Deckungsgrad pro Gebäude von Potenzial und Verbrauch sind in einem separaten Kartenblatt aufgeführt.

Bei schwarzen Standorte liegen keine Daten vor, weshalb bei diesen Gebäuden kein direkter Vergleich möglich ist.

Dunkelrote Standorte besitzen die höchsten Werte.

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh) Wärmebedarfsdeckung mit Erdwärme

Legende

Wärmebedarfsdeckung: Preis pro Energieeinheit 2b*

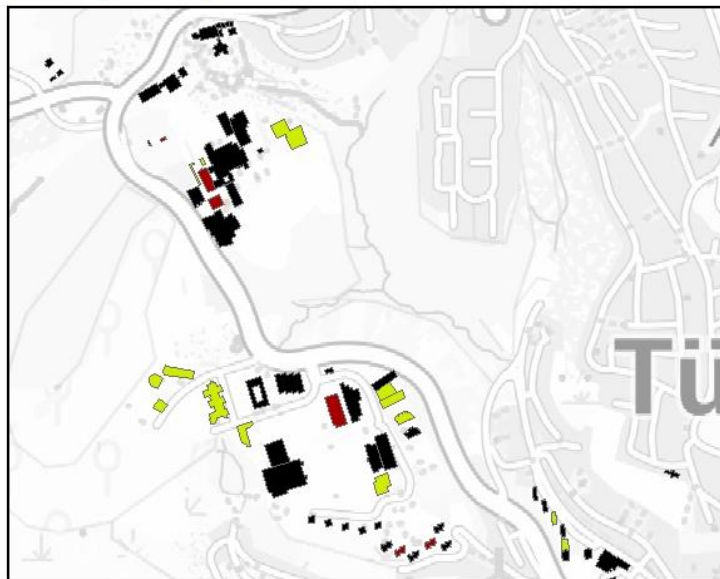
Preis Euro/kWh (nach Heizlast)

- keine Daten vorhanden (37)
- Klasse 1: Preis sehr gering (bis 0,05 Euro) (0)
- Klasse 2: Preis niedrig (bis 0,10 Euro) (1)
- Klasse 3: Preis durchschnittlich (bis 0,15 Euro) (41)
- Klasse 4: Preis erhöht (bis 0,20 Euro) (2)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 0,32 Euro) (0)

Erläuterung

Diese Vergleichskarte zeigt pro Standort den kWh-Preis bei Nutzung des ermittelten Erdwärmepotenzials in Höhe der Wärmebedarfsdeckung. Die Werte sind in 5 Klassen unterteilt. Überwiegend weisen die Standorte kWh-Preise zwischen 0,10-0,15 Euro/kWh auf. Einzelne Standorte weisen hier günstigere kWh-Preise als die Verbrauchswerte auf.

0 0,25 0,5 1 Kilometer



Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh) Wärmeverbrauch

Legende

Wärmeverbrauch Preis pro Energieeinheit

Preis pro kWh (Euro/kWh)

- keine Daten vorhanden (48)
- Klasse 1: Preis sehr gering (bis 0,05 Euro/kWh) (0)
- Klasse 2: Preis niedrig (bis 0,10 Euro/kWh) (14)
- Klasse 3: Preis durchschnittlich (bis 0,15 Euro/kWh) (0)
- Klasse 4: Preis erhöht (bis 0,20 Euro/kWh) (0)
- Klasse 5: Ausreißer (0,21-0,70 Euro/kWh) (6)

Erläuterung

Die Vergleichskarte zeigt die gebäudebezogenen kWh-Preise, die sich aus Verbrauch und Kosten ergeben (2015). Im Vergleich mit den Kosten für die Nutzung von Erdwärme zeigen sich Standorte mit Einsparpotenzial bei den Kosten. Die Werte sind in 5 Klassen unterteilt an. Überwiegend weisen die Standorte kWh-Preise zwischen 0,05-0,10 Euro/kWh auf.

0 0,25 0,5 1 Kilometer

Vergleichskarten

Kartenausschnitt Campus Morgenstelle und Universitätsklinikum Schnarrenberg

Anmerkung

Die Neubauten und Fertigstellungen von Gebäuden nach dem Jahr 2015 sind nicht berücksichtigt.

Der Deckungsgrad pro Gebäude von Potenzial und Verbrauch sind in einem separaten Kartenblatt aufgeführt.

Bei schwarzen Standorte liegen keine Daten vor, weshalb hier kein direkter Preisvergleich möglich ist.

Dunkelrote Standorte besitzen die höchsten Preise.

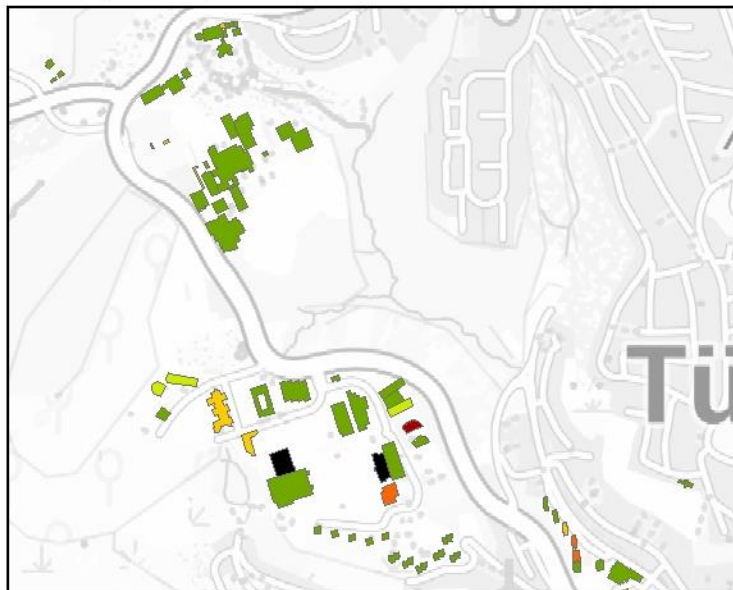
TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0.0000
Central Meridian: 9.0000
Scale Factor: 0.9996
Latitude Of Origin: 0.0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





0 0,25 0,5 1 Kilometer



0 0,25 0,5 1 Kilometer

Solarpotenzial in kWh/a

Legende

PV-Solarpotenzial ganze Dachflächen

Potenzial MW h/a

- keine Daten vorhanden (0)
- Klasse 1: sehr niedrig (bis 100 MW h/a) (49)
- Klasse 2: gering (bis 200 MW h/a) (37)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 500 MW h/a) (55)
- Klasse 4: hoch (bis 1.000 MW h/a) (22)
- Klasse 5: Ausreißer (über 1.000 MW h/a) (8)

Erläuterung

Diese Vergleichskarte zeigt das PV-Strompotenzial in MW h/a als Gesamtwert pro Gebäude. Alle Teildachflächen sind zu einem Potenzialwert aufaddiert. Die Werte sind in 5 Klassen unterteilt. Einzelne Standorte weisen überdurchschnittlich hohe Potenzialwerte auf (Dunkelrot=Ausreißer ab 1.000 MW h/a).

Stromverbrauch in kWh/a

Legende

Stromverbrauch gebäudespezifisch

MWh/a

- keine Daten vorhanden (2)
- Klasse 1: sehr niedrig (bis 100 MW h/a) (52)
- Klasse 2: gering (bis 200 MW h/a) (4)
- Klasse 3: durchschnittlich (bis 500 MW h/a) (6)
- Klasse 4: hoch (bis 1.000 MW h/a) (3)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 14.800 MW h/a) (1)

Erläuterung

Die Vergleichskarte zeigt die gebäudespezifischen Verbrauchswerte von Strom (2015). Die Werte sind in den selben 5 Klassen unterteilt und weisen stellenweise im Vergleich eine niedrigere Werteklasse auf als das Potenzial. An diesen Standorten kann das Potenzial den Strombedarf überwiegend oder vollständig decken.

Vergleichskarten

Kartenausschnitt Campus Morgenstelle und Universitätsklinikum Schnarrenberg

Anmerkung

Die Neubauten und Fertigstellungen von Gebäuden nach dem Jahr 2015 sind nicht berücksichtigt.

Der Deckungsgrad pro Gebäude von Potenzial und Verbrauch sind in einem separaten Kartenblatt aufgeführt.

Bei schwarzen Standorte liegen keine Daten vor, weshalb hier kein direkter Vergleich möglich ist.

Dunkelrote Standorte besitzen die höchsten Werte.

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N

Projection: Transverse Mercator

Datum: WGS 1984

False Easting: 500.000,0000

False Northing: 0,0000

Central Meridian: 9,0000

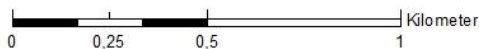
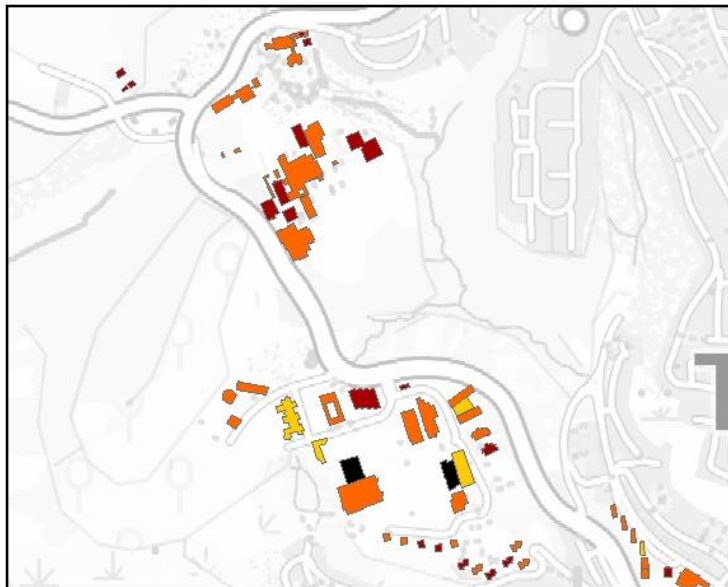
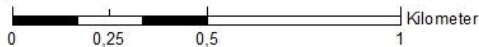
Scale Factor: 0,9996

Latitude Of Origin: 0,0000

Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh) Strompotenzial für Photovoltaik

Legende

PV-Solarpotenzial: Preis pro Energieeinheit

Preis pro kWh

- keine Daten vorhanden (0)
- Klasse 1: Preis sehr gering (bis 0,05 Euro/kWh) (22)
- Klasse 2: Preis niedrig (bis 0,10 Euro/kWh) (113)
- Klasse 3: Preis durchschnittlich (bis 0,15 Euro/kWh) (19)
- Klasse 4: Preis erhöht (bis 0,20 Euro/kWh) (4)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 0,36 Euro/kWh) (2)

Erläuterung

Diese Vergleichskarte zeigt pro Standort den kWh-Preis bei Nutzung des ermittelten Strompotenzials. Die Werte sind in 5 Klassen unterteilt. Überwiegend weisen die Standorte kWh-Preise zwischen 0,05-0,10 Euro/kWh auf. Überwiegend weisen die Standorte hier günstigere kWh-Preise als die Verbrauchswerte auf.

Preis pro Energieeinheit (Euro/kWh) Stromverbrauch

Legende

Stromverbrauch Preis pro Energieeinheit

Preis pro kWh (Euro/kWh)

- keine Daten vorhanden (2)
- Klasse 1: Preis sehr gering (bis 0,05 Euro/kWh) (0)
- Klasse 2: Preis niedrig (bis 0,10 Euro/kWh) (0)
- Klasse 3: Preis durchschnittlich (bis 0,15 Euro/kWh) (5)
- Klasse 4: Preis erhöht (bis 0,20 Euro/kWh) (40)
- Klasse 5: Ausreißer (bis 0,36 Euro/kWh) (19)

Erläuterung

Die Vergleichskarte zeigt die gebäudebezogenen kWh-Preise, die sich aus Verbrauch und Kosten ergeben (2015). Die Werte sind in 5 Klassen unterteilt an. Im Vergleich mit den kWh-Preisen des Solarpotenzials weisen die Standorte überwiegend höhere kWh-Preise auf: zwischen 0,15 bis max. 0,36 Euro/kWh auf.

Vergleichskarten

Kartenausschnitt Campus Morgenstelle und Universitätsklinikum Schnarrenberg

Anmerkung

Die Neubauten und Fertigstellungen von Gebäuden nach dem Jahr 2015 sind nicht berücksichtigt.

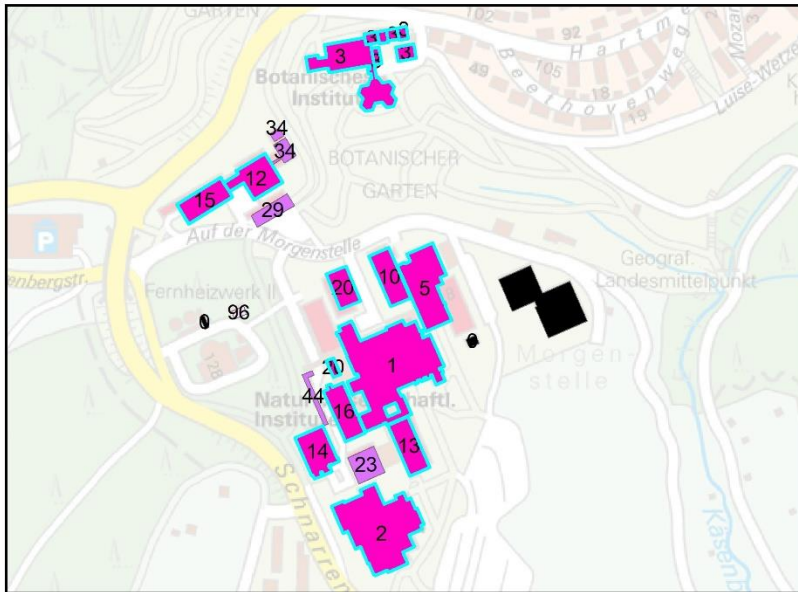
Der Deckungsgrad pro Gebäude von Potenzial und Verbrauch sind in einem separaten Kartenblatt aufgeführt.

Bei schwarzen Standorte liegen keine Daten vor, weshalb hier kein direkter Preisvergleich möglich ist. Dunkelrote Standorte besitzen die höchsten Preise.

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022





Naturwissenschaften auf der Morgenstelle

Kartenausschnitte

Im Kartenausschnitt der Gebäude der Naturwissenschaften auf der Morgenstelle sind die Rangfolgenplätze an den Polygonen angezeigt.

Die Top-20 sind in dieser Höhenlage vertreten, da hier das höchste Potenzial für Geothermie besteht. Teilweise erreichen einzelne Gebäudeabschnitte einen sehr guten Rangfolgenplatz durch gewichtete Indikatoren.

Top 20 - Standorte für Erdwärme Universität Tübingen

Tübingens next TOP-Places for renewable energies

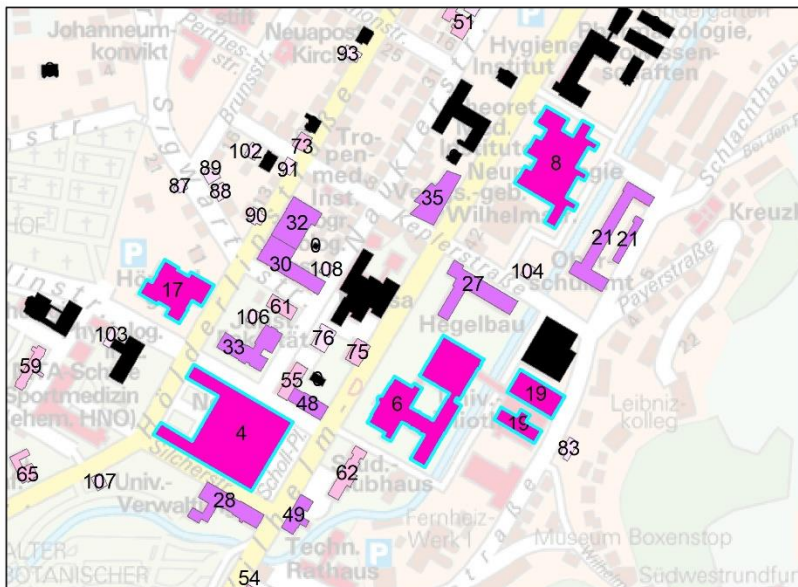
Legende

Rangplätze

■	0 (3)
■	1 - 20 (18)
■	21 - 50 (5)
■	51 - 75 (0)
■	76 - 108 (1)

Anmerkung

Die Gebäude der Universität sind nach gewichteten Indikatoren gerankt. Die hervorgehobenen Flächen (blau) gehören zu den Top- 20 Standorten für Erdwärme. Die Kartenausschnitte Morgenstelle und Wilhelmstraße zeigen einzelne Bereiche des Untersuchungsgebietes. Bei schwarzen Standorten liegen keine Daten vor,



Campus Wilhelmstraße

Im Kartenausschnitt des Campus Wilhelmstraße sind ebenfalls Rangfolgenplätze unter den Top-20 vertreten. Überwiegend liegen die Gebäude in der Rangfolgenliste hier zwischen dem 70. bis 120. Platz.

In den Tallagen sind grundsätzlich strengere Auflagen für den Bau von Erdwärmesonden zu beachten.

Legende

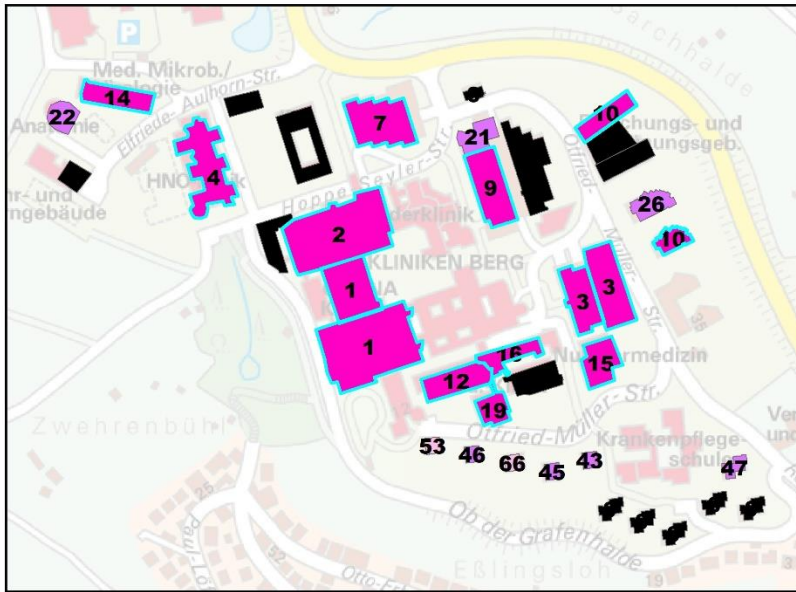
Rangplätze

■	0 (18)
■	1 - 20 (6)
■	21 - 50 (10)
■	51 - 75 (9)
■	76 - 108 (15)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
 Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 False Easting: 500.000.000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 9,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
 Dissertation 2023



Schnarrenberg-Kliniken

Kartenausschnitte

Im Kartenausschnitt der Gebäude auf dem Schnarrenberg sind die Rangfolgenplätze an den Polygonen angezeigt. Die Top-20 sind in dieser Hanglage vertreten. Teilweise erreichen einzelne Gebäudeabschnitte einen sehr guten Rangfolgenplatz durch gewichtete Indikatoren.

Top 20 - Standorte für Erdwärme Universitätsklinikum

Tübingens next TOP-Places for renewable energies

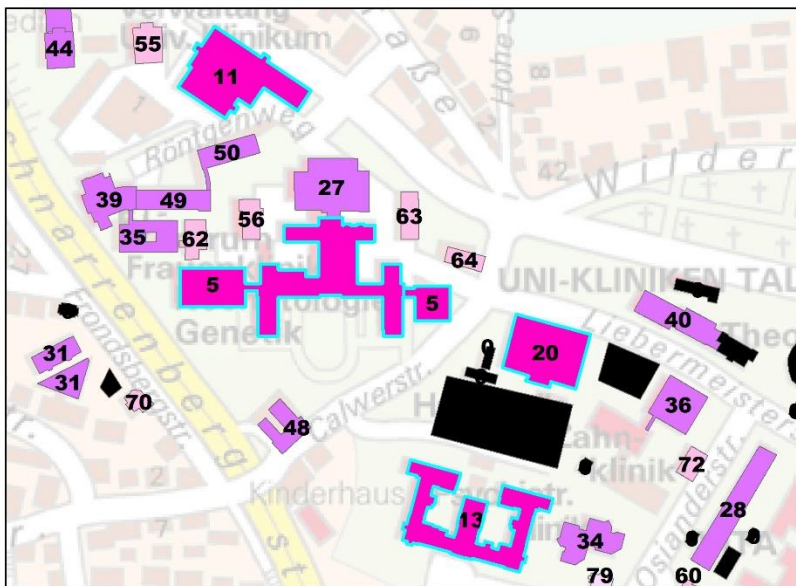
Legende

Rangfolgenplatz

- 0 (14)
- 1 - 20 (15)
- 21 - 50 (7)
- 51 - 75 (2)
- 77 - 84 (0)

Anmerkung

UKT-Standorte sind nach gewichteten Indikatoren gerankt. Die hervorgehobenen Flächen (blau) gehören zu den Top 20 Standorten für Erdwärme. Die Kartenausschnitte Schnarrenberg und Tal zeigen einzelne Bereiche des Untersuchungsgebietes. Bei schwarzen Standorte liegen keine Daten vor,



Kliniken im Tal

Im Kartenausschnitt der Klinikumsgebäude im Tal sind ebenfalls Rangfolgenplätze unter den Top-20 vertreten. Überwiegend liegen die Gebäude in der Rangfolgenliste hier zwischen dem 20. bis 50. Platz. Hier sind Investitionen dennoch sehr zu empfehlen.

Legende

Rangfolgenplatz

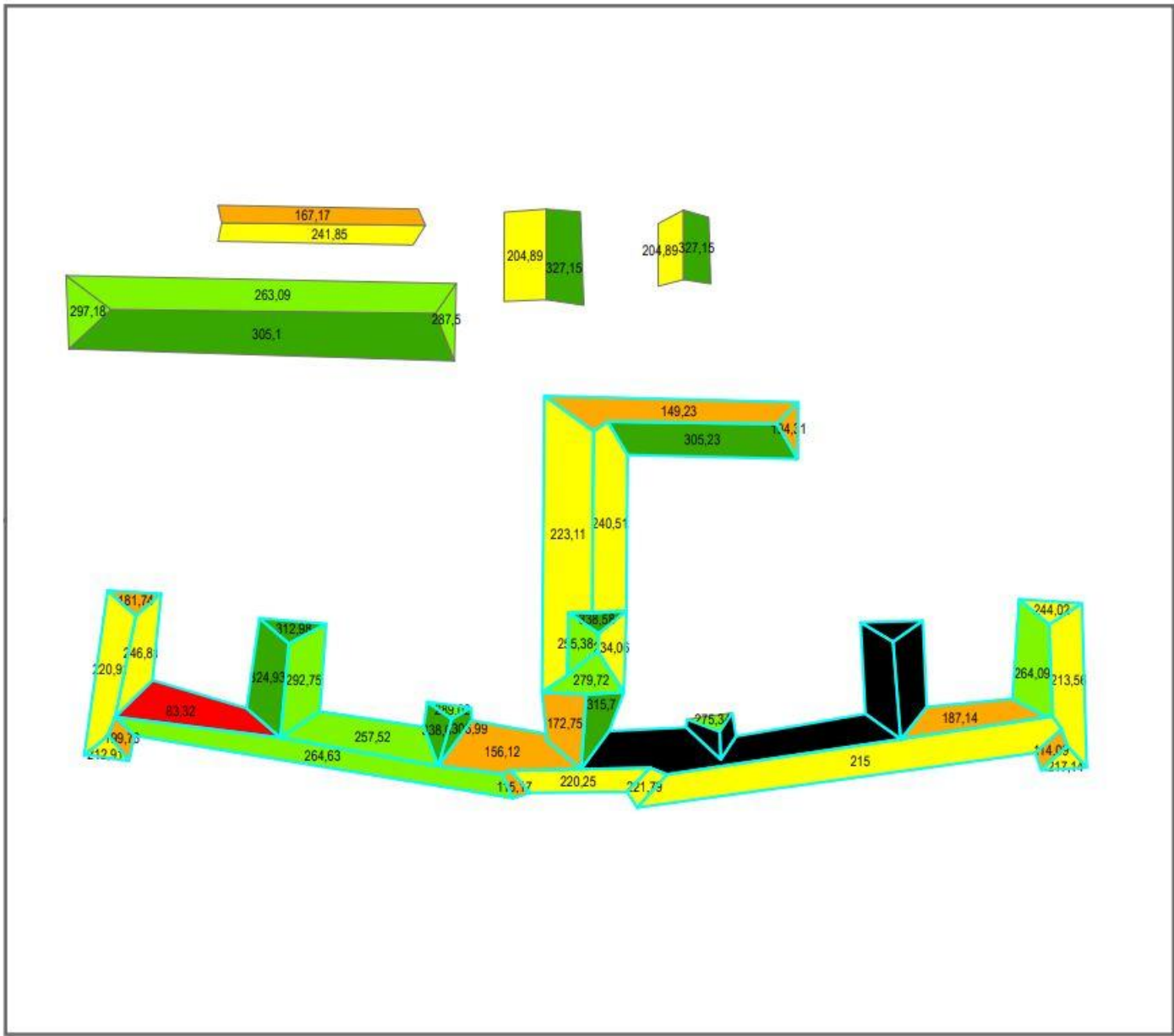
- 0 (14)
- 1 - 20 (5)
- 21 - 50 (14)
- 51 - 75 (8)
- 77 - 84 (1)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500,000,000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2022



Detailansicht

Gebäude 7064
Auf dem Sand - Fachbereich Informatik

Indikator 1b
Jahresertrag pro kWh/m²
Photovoltaik

Erläuterung

Indikator 1b: Flächenbewertung nach Jahresertrag pro Quadratmeter in kWh/m².

Auf dem Gebäude 7064 befinden sich mehrere Dachfläche unter den Top 20 in dieser Arbeit. Die Karte teilt die Werte in 5 Klassen (Equal Breaks) - ohne Abzüge von Verlusten- ein.

Legende

Jahresertrag kWh/m²

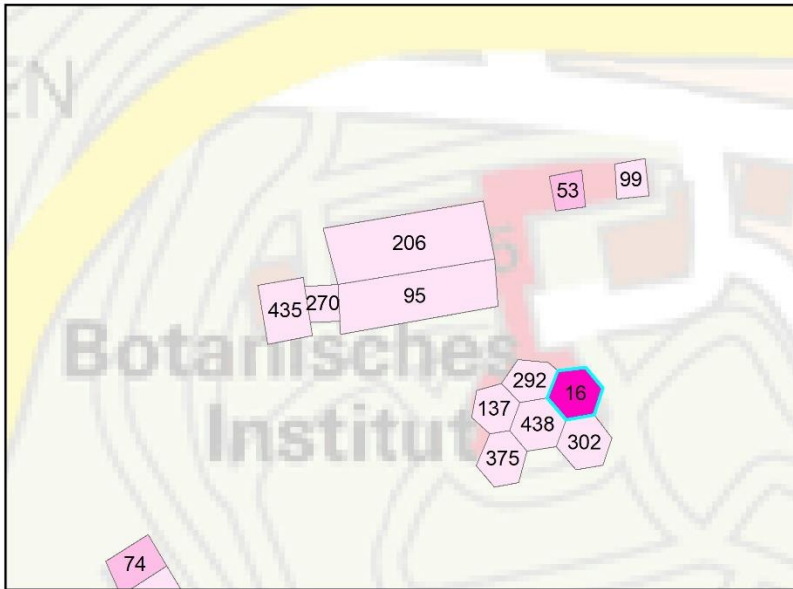
kWh/m²

- keine Daten vorhanden (6)
- Klasse 1: sehr gering (bis 100 kWh/m²) (1)
- Klasse 2: niedrig (bis 200 kWh/m²) (10)
- Klasse 3: relativ gut (bis 250 kWh/m²) (15)
- Klasse 4: gut (bis 300 kWh/m²) (11)
- Klasse 5: sehr gut (bis max. 365 kWh/m²) (10)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2023





Naturwissenschaften auf der Morgenstelle

Im Kartenausschnitt der Gebäude der Naturwissenschaften auf der Morgenstelle zeigt eine Teildachfläche den 16. Rangfolgenplatz auf.
Die Top-20 für PV-Anlagen sind in dieser Höhenlage überraschenderweise nicht vertreten.
Teilweise erreichen einzelne Gebäudeabschnitte dennoch einen guten Rangfolgenplatz durch gewichtete Indikatoren.

Legende

Rangplätze

- 0 (0)
- 1 - 20 (1)
- 21 - 50 (0)
- 51 - 75 (2)
- 76 - 528 (11)

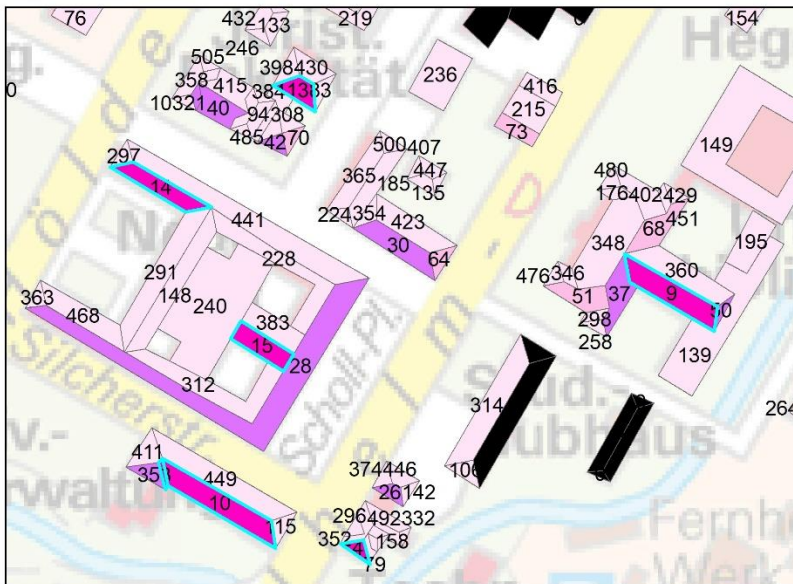
Kartenausschnitte

Top 20 - Standorte für Photovoltaik Universität Tübingen

Tübingens next TOP-Places for renewable energies

Anmerkung

Die Gebäude der Universität sind nach gewichteten Indikatoren gerankt.
Die hervorgehobenen Flächen (blau) gehören zu den Top- 20 Standorten für Photovoltaik.
Die Kartenausschnitte heben einzelne Teildachflächen hervor.
Bei schwarzen Standorten liegen keine Daten vor,



Campus Wilhelmstraße

Im Kartenausschnitt des Campus Wilhelmstraße sind einzelne Teildachflächen unter den Top-20 für Photovoltaik.
Einige Gebäude weisen mehrere sehr gute bis gute Teildachflächen auf, die zwischen dem 20. bis 50. Rangplatz liegen. Hier gilt die Stadtbild-Verordnung, da diese Dächer einsehbar sind.

Legende

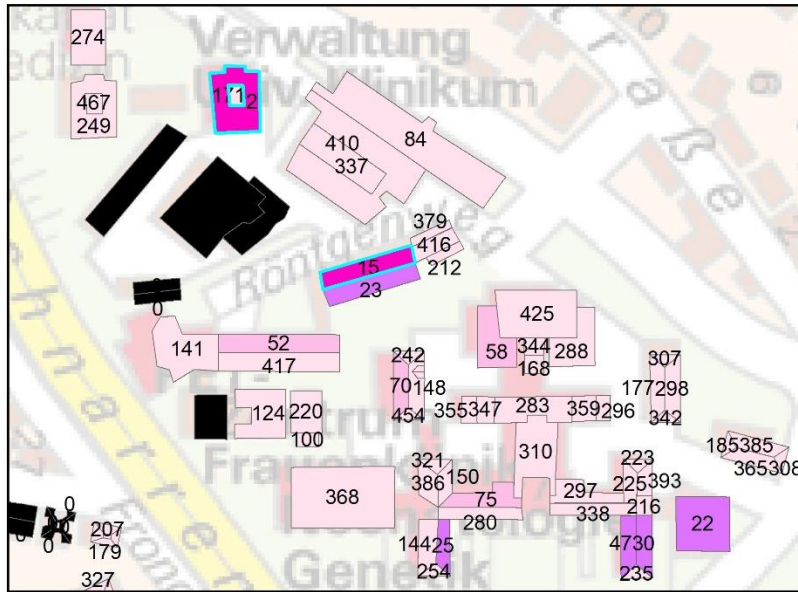
Rangplätze

- 0 (10)
- 1 - 20 (7)
- 21 - 50 (9)
- 51 - 75 (5)
- 76 - 528 (79)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2023



Universitätsklinikum Kliniken im Tal

Kartenausschnitte

Im Kartenausschnitt um die Frauenklinik zeigt einzelne Teildachflächen unter den Top-20 und bis zum 50. Rangfolgenplatz. Überwiegend liegen umliegende Teildachflächen auf Rangfolgeplätzen zwischen 100-500.

Top 20 - Standorte für Photovoltaik Universitätsklinikum

Tübingens next TOP-Places for renewable energies

Legende

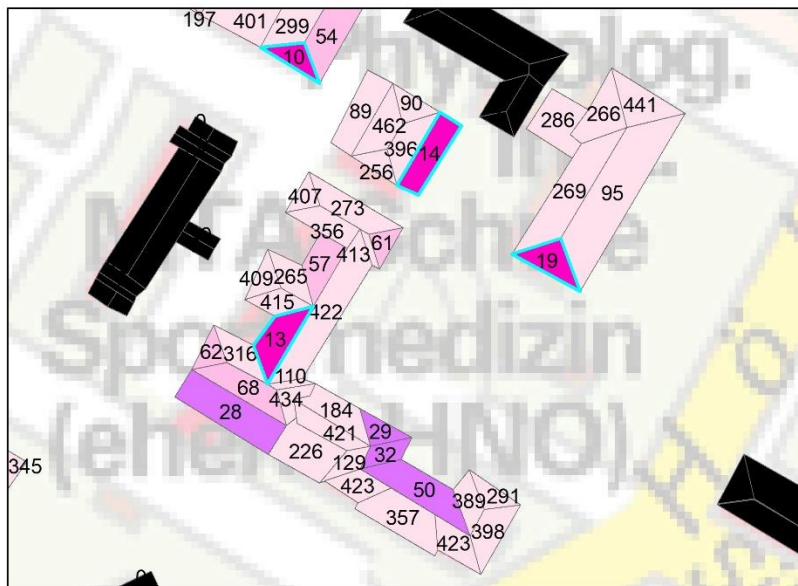
Rangplätze

- 0 (12)
- 1 - 20 (2)
- 21 - 50 (5)
- 51 - 75 (4)
- 76 - 468 (59)

Anmerkung

Die Teildachflächen des Universitätsklinikums sind nach gewichteten Indikatoren gerankt. Die hervorgehobenen Flächen (blau) gehören zu den Top- 20 Standorten für Photovoltaik. Die Kartenausschnitte heben einzelne Teildachflächen um die Frauenklinik und die Sportmedizin hervor.

Bei schwarzen Standorten liegen keine Daten vor,



Gebäudekomplex Sportmedizin

Im Kartenausschnitt des Gebäudekomplexes Sportmedizin befinden sich einzelne Teildachflächen unter den Top-20 für Photovoltaik.

Einige Gebäude weisen mehrere sehr gute bis gute Teildachflächen auf, die zwischen dem 20. bis 70. Rangplatz liegen. Hier gilt die Stadtbild-Verordnung, da diese Dächer einsehbar sind.

Legende

Rangplätze

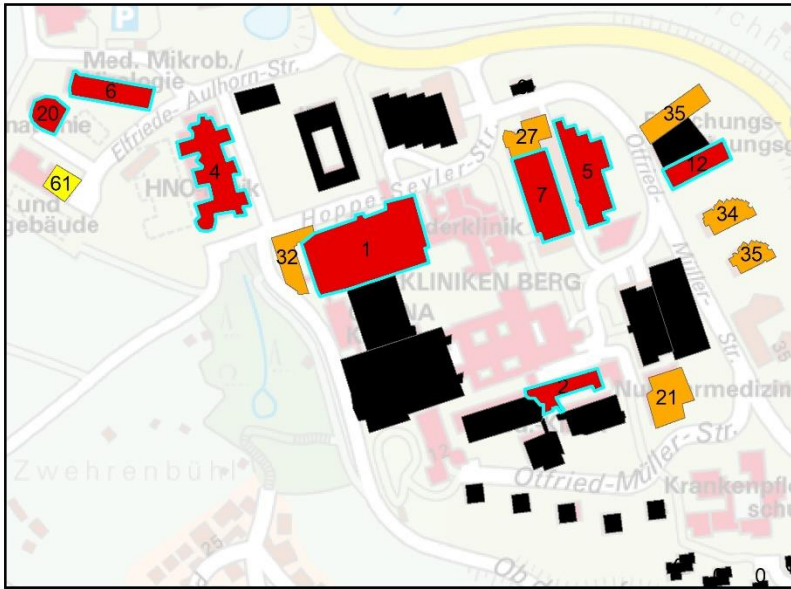
- 0 (24)
- 1 - 20 (4)
- 21 - 50 (4)
- 51 - 75 (5)
- 76 - 468 (36)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 False Easting: 500,000,000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 9,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
 Dissertation 2023



Universitätsklinikum Schnarrenberg-Kliniken

Kartenausschnitte

Im Kartenausschnitt um den Gebäudekomplex der CRONA-Kliniken belegen die Gebäude die ersten Rangplätze.
Bedingt durch den hohen Energiebedarf für medizinische Hochtechnologie ergeben sich hohe Kosten und CO₂-Werte.

Die 20 Standorte des UKT:
- **höchster Verbrauch**
- **höchste Energiekosten**
- **höchste CO₂-Werte**

Tübingens worst Places

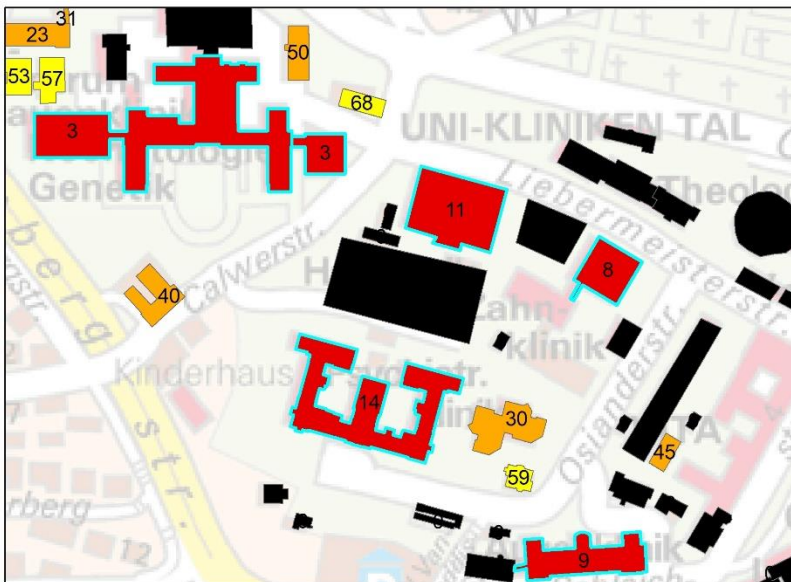
Legende

Rangplätze

- 0 (21)
- 1 - 20 (8)
- 21 - 50 (6)
- 52 - 75 (1)
- 76 - 77 (0)

Anmerkung

Die Rangfolgenbildung nach Indikator 4 ergeben ein Ranking nach Energieverbrauch und -kosten sowie nach CO₂-Werten (siehe Methodik). Die Gebäude weisen nach den Klimaschutzzielen 2023 den höchsten Handlungsbedarf auf. Bei schwarzen Standorten liegen keine Daten vor,



Kliniken im Tal

Die Kliniken im Tal zeigen in diesem Kartenausschnitt weitere Gebäudekomplexe unter den ersten 20 mit hohen Verbräuchen.
Nach der Indikatorenbewertung besteht hier ebenfalls besonderer Handlungsbedarf für die Erreichung der Klimaschutzziele 2023.

Legende

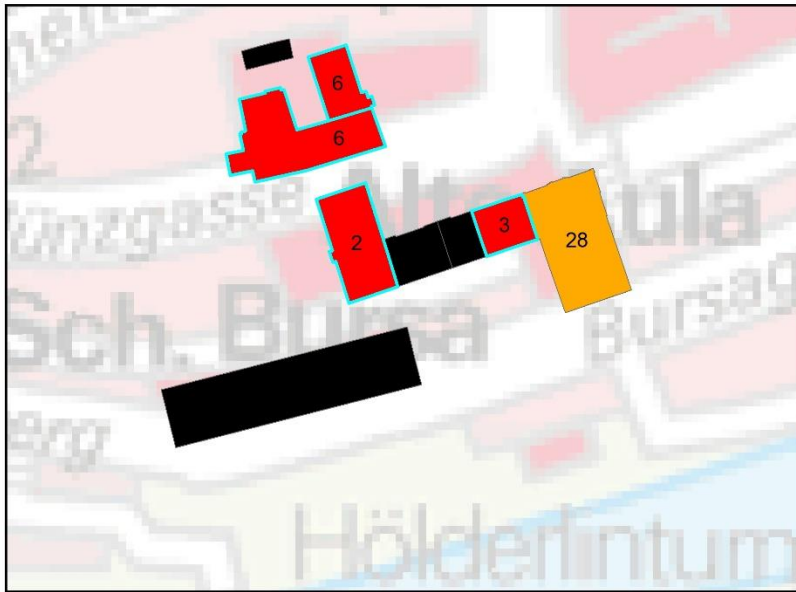
Rangplätze

- 0 (27)
- 1 - 20 (6)
- 21 - 50 (6)
- 52 - 75 (4)
- 76 - 77 (0)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: 9,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
Dissertation 2023



Universitätsgebäude Seminar für Erziehungswissenschaften

Im Kartenausschnitt sind die Gebäude in der Nähe des Tübinger Schlosses abgebildet. An zweiter Stelle des Ranking nach Indikatoren steht der Gebäudekomplex in der Münzgasse. Bedingt durch den hohen Energiebedarf und den Sanierungsbedarf des Denkmal geschützten Gebäudes ergeben sich hohe Kosten und CO2-Werte.

Legende

Rangplätze	
■ (Black)	0 (4)
■ (Red)	2 - 20 (4)
■ (Orange)	21 - 50 (1)
■ (Yellow)	51 - 75 (0)
■ (Green)	78 - 101 (0)

Kartenausschnitte

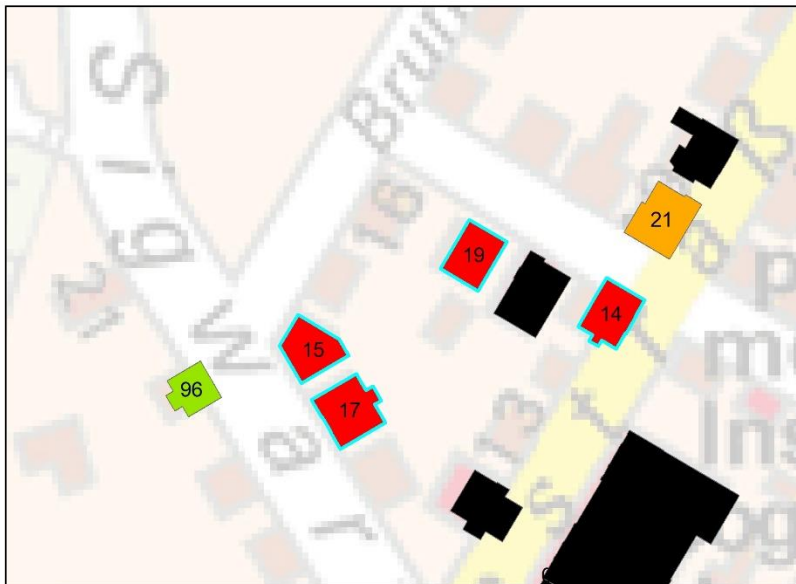
Die 20 Standorte der Universität:

- höchster Verbrauch
- höchste Energiekosten
- höchste CO2-Werte

Tübingens worst Places

Anmerkung

Die Rangfolgenbildung nach Indikator 4 ergeben ein Ranking nach Energieverbrauch und- kosten sowie nach CO2-Werten (siehe Methodik). Die Gebäude weisen nach den Klimaschutzzielen 2023 den höchsten Handlungsbedarf auf. Bei schwarzen Standorten liegen keine Daten vor.



Einzelgebäude Bereich Hölderlinstraße

Einzelne Universitätsgebäude in der Sigwartstraße befinden sich unter den 20 schlechtesten Bewertungen. Darin befinden sich die Wirtschaftswissenschaften und ein Teil der Geowissenschaftlichen Seminare mit Verwaltung. Nach der Indikatorenbewertung besteht hier ebenfalls besonderer Handlungsbedarf für die Erreichung der Klimaschutzziele 2023.

Legende

Rangplätze	
■ (Black)	0 (5)
■ (Red)	2 - 20 (4)
■ (Orange)	21 - 50 (1)
■ (Yellow)	51 - 75 (0)
■ (Green)	78 - 101 (1)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)
 Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 False Easting: 500,000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 9,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
 Dissertation 2023



Detailansicht

Gebäude der Schnarrenberg-Kliniken
 Selektierte Teildachflächen
 mit günstigstem Kilowattpreis
 (0,04-0,05 Euro/kWh)

Indikator 2a -Preis pro Energieeinheit Photovoltaik

Erläuterung

Indikator 2a:
 Die Gebäude der Schnarrenberg-Kliniken zeigen günstigste
 Kilowattpreise auf einzelnen Teildachflächen.
 Die Karte teilt die Flächen in 5 Klassen ein.
 Auf den hervorgehobenen Teildachflächen kann
 sehr günstig Solarstrom produziert werden in
 Abhängigkeit von Energiepotenzial, Konfiguration
 und Flächengröße.

Legende

Jahresertrag kWh/m²

kWh/m²

- keine Daten vorhanden (0)
- Klasse 1: sehr gering (bis 100 kWh/m²) (0)
- Klasse 2: niedrig (bis 200 kWh/m²) (4)
- Klasse 3: relativ gut (bis 250 kWh/m²) (16)
- Klasse 4: gut (bis 300 kWh/m²) (54)
- Klasse 5: sehr gut (bis max. 365 kWh/m²) (4)

TopPlusOpen P50 Graustufen (Obsolet)

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 32N

Projection: Transverse Mercator

Datum: WGS 1984

False Easting: 500.000.0000

False Northing: 0.0000

Central Meridian: 9.0000

Scale Factor: 0,9996

Latitude Of Origin: 0,0000

Units: Meter

Author: Sandy-Cheril Manton - Diplom-Geographin
 Dissertation 2023

