

**Aus der Universitätsklinik
für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Abteilung Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik mit Propädeutik
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. H. Weber
Sektion für Medizinische Werkstoffkunde und Technologie
Leiter: Professor Dr. J. Geis-Gerstorfer**

**Fließeigenschaften von A-Silikon und Polyether
während der Applikationsphase**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen**

**vorgelegt von
Melanie Elisabeth-Ruth von Pastau
aus München**

2007

Dekan: Professor Dr. I. B. Autenrieth
1. Berichterstatter: Professor Dr. J. Geis-Gerstorfer
2. Berichterstatter: Professor Dr. C. Löst

Inhaltsverzeichnis:

1. Einführung	5
2. Literaturüberblick zur Abformung	7
2.1. Abformmaterialien.....	7
2.1.1. Übersicht Abformmaterialien	7
2.1.2. Historische Entwicklung der Abformmaterialien	9
2.1.3. Anforderungen an die Abformmaterialien.....	10
2.2. Elastomere Abformmaterialien.....	11
2.2.1. Definition nach EN ISO 4823	11
2.2.2. Benetzungseigenschaften	12
2.2.3. Fließeigenschaft	14
2.2.4. Abbindeverhalten	15
2.2.5. Gummielastizität.....	16
2.3. Prüfung der Fließeigenschaften - Rheometer	18
2.3.1. Wirkungsweise der Rheometer	18
2.3.2. Bauarten der Rheometer.....	19
2.3.3. Prüfgerät nach EN ISO 4823 (2001):	22
2.4. Abformmethoden	24
2.4.1. Übersicht Abformmethoden.....	24
2.4.2. Historische Entwicklung der Abformmethoden.....	25
3. Ziele der Arbeit.....	27
4. Material und Methoden.....	29
4.1. Verwendete Abformmaterialien.....	29
4.2. Verwendete Prüfmethoden	32
4.2.1. Haifischflossen-Test.....	32
4.2.2. Versuchsaufbau	34
5. Durchführung der Untersuchung	37
5.1. Herstellung der Prüfkörper (Haifischflossen)	37
5.2. Messung des Stempelweges	41
5.3. Auswertungsmethoden	43
5.3.1. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe.....	43
5.3.2. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe	44
5.3.3. Zeit bis Stempelstillstand.....	46
6. Ergebnisse	48
6.1. Affinis Light Body	48
6.1.1. Stempelweg über Zeit ab Messbeginn	48
6.1.2. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe.....	51
6.1.3. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe	52
6.1.4. Zeit bis Stempelstillstand.....	54
6.2. Aquasil Ultra LV	56
6.2.1. Stempelweg über Zeit ab Messbeginn	56
6.2.2. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe.....	59

6.2.3. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe	60
6.2.4. Zeit bis Stempelstillstand.....	61
6.3. Flexitime Correct Flow	63
6.3.1. Stempelweg über Zeit ab Messbeginn	63
6.3.2. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe	66
6.3.3. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe	67
6.3.4. Zeit bis Stempelstillstand.....	68
6.4. Impregum Garant L Duo Soft.....	70
6.4.1. Stempelweg über Zeit ab Messbeginn	70
6.4.2. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe	73
6.4.3. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe	74
6.4.4. Zeit bis Stempelstillstand.....	75
6.5. Vergleich der 4 verwendeten Abformmaterialien	77
6.5.1. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe bei 21 °C	77
6.5.2. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe bei 21 °C	78
6.5.3. Zeit bis Stempelstillstand bei 21 °C	79
6.5.4. Vergleich der Verarbeitungszeiten	80
6.6. Standardabweichungen der Meßergebnisse	81
7. Diskussion	83
8. Zusammenfassung	89
9. Literaturverzeichnis	90
10. Danksagung	95
11. Lebenslauf	96

1. Einführung

Die hohe Fließfähigkeit von A-Silikon und Polyether während der Applikationsphase ist eine wichtige Voraussetzung für die präzise Abformung eines präparierten Zahnstumpfes.

Die Firma 3M Espe hat mit dem Haifischflossen-Test eine Methode entwickelt, mit der die Fließfähigkeit eines Abformmaterials unter Druck bestimmt werden kann. Die vorhandene Literatur über diesen Test beschränkt sich auf Veröffentlichungen von 3M Espe und IADR bzw. AADR Meeting Abstracts. Durch unterschiedliche Untersuchungsbedingungen und Abformmaterialien lassen sich die vorhandenen Ergebnisse aus der Literatur nicht direkt mit den Ergebnissen dieser Untersuchung vergleichen. Grundlegende Erkenntnisse werden sich jedoch möglicherweise bestätigen.

In Kapitel 4.2.1. ist der Haifischflossentest der Firma 3M Espe ausführlich dargestellt. Einerseits soll der Stempel das Einsinken des Zahnes in die Abformmasse, andererseits soll der Spalt im Stempel (Haifischflosse) das Eindringen der Abformmasse in den Sulkus (Spalt zwischen Zahn und Zahnfleisch) simulieren. Das Gewicht des Stempels mit 147 g (für einen Zahn) entspricht in etwa der üblicherweise beim Abformen auf den Löffel aufbrachten Kraft von 30 N für einen Kiefer. Am Ende des Testes muss die Höhe der so entstandenen Haifischflosse aus Abformmaterial jedoch von Hand vermessen werden.

Um diesen Vorgang des subjektiven Handvermessens durch ein rechnergestütztes Weg-Messprogramm zu ersetzen, wurde von der Sektion Medizinische Werkstoffkunde und Technologie, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde des Universitätsklinikums Tübingen, ein entsprechender Versuchsaufbau entwickelt. Der Versuchsaufbau ist in Kapitel 4.2.2. ausführlich dargestellt. Dieser Versuchsaufbau kombiniert die Original-Vorrichtung für den Haifischflossen-Test mit einem berührungslosen Laser-Wegmessgerät und einer Heizvorrichtung für die Haifischflossen-Vorrichtung (siehe Abb. 11). Das Wegmessgerät ist über der Vorrichtung für den Haifischflossen-Test angeordnet und misst den Weg des in die abbildende

Abformmasse einsinkenden Stempels. Die Laser-Wegmessung ist rechnergesteuert, die Messdaten werden gespeichert und mit Hilfe des Excel- und Originprogramms ausgewertet.

Während mit dem herkömmlichen Haifischflossen-Test nur die abgebundene Flosse vermessen werden kann, ist es mit diesem Versuchsaufbau möglich, zusätzliche Erkenntnisse über das Fließverhalten des Abformmaterials während der Abbindezeit zu gewinnen. Dies soll dem besseren Verständnis des Materialverhaltens dienen und ggf. Berücksichtigung bei der klinischen Abformung finden.

Durch eine zeitlich gestaffelte Versuchsreihe 30, 60, 90, 120, 150 und 180 s nach Mischbeginn soll versucht werden einen Zusammenhang mit der Verarbeitungszeit herzustellen. Die Verarbeitungszeit wird bisher mit kostenaufwendigen Rheometern bzw. nach EN ISO 4823 bestimmt.

Weiterhin werden zur Ermittlung des quantitativen Unterschieds des Abbindeverhaltens verschiedene Materialtemperaturen von 18, 21, 25 und 28 °C untersucht. Dies entspricht den tatsächlich möglichen Verhältnissen in der Praxis je nach Lagerung und Jahreszeit.

Die vorliegende Untersuchung, die an der Sektion Medizinische Werkstoffkunde und Technologie der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde des Universitätsklinikums Tübingen durchgeführt wurde, soll Aufschluss über die Praxistauglichkeit des Versuchsaufbaus zur Beurteilung auf dem Markt befindlicher Abformmaterialien geben.

2. Literaturüberblick zur Abformung

Die Abformung hat auch gegenwärtig noch eine zentrale Bedeutung bei der Herstellung von Zahnersatz über ein Modell als Informationsträger zwischen Zahnarzt und Zahntechniker. Je besser Dimensionstreue und Detailwiedergabe zu Beginn der Arbeitskette, desto passgenauer ist auch der auf dieser Basis gefertigte Zahnersatz.

2.1. Abformmaterialien

2.1.1. Übersicht Abformmaterialien

Eine zweckmäßige Gliederung der Dental-Abformmaterialien nach deren Eigenschaften sowie deren Verarbeitung ergibt eine Einteilung in 4 Gruppen. Der Vollständigkeit halber sind auch heute kaum noch gebräuchliche Materialien aufgeführt [9, 10, 20, 22, 25, 26, 32, 37, 38, 41, 42]:

- Irreversibel-starre Abformmaterialien:

z.B. Abformgips,
Zinkoxid-Eugenol-Pasten und
Kunststoffabformmassen.

Diese Materialien werden im plastischen Zustand in den Mund gebracht, binden irreversibel ab und können nicht in toto aus dem Mund entfernt werden.

- Reversibel-starre, thermoplastische Abformmaterialien:

z.B. Kompositionsabformmassen (plastische Stoffe, elastische Stoffe,
Weichmacher, Füllstoffe und Farbstoffe),
Guttapercha und
Adheseal.

Diese Materialien werden durch Erhitzung plastisch gemacht und härten bei Abkühlung durch Mundtemperatur wieder aus.

- Reversibel-elastische, thermoplastische Abformmaterialien:

z.B. Hydrokolloide (Agar-Agar-Massen).

Agar-Agar bildet mit einer großen Menge Wasser unterhalb von 40 °C ein Gel, nach dem Aufkochen bei ca. 70 °C ein dünnflüssiges Sol. Die Applikationstemperatur liegt bei 45 °C. Anschließend erfolgt eine Rückkühlung

im Löffel (Wasserdurchlaufkühlung) zur Vermeidung von Spannungen im Material, welche jedoch nicht unter 18 °C absinken darf.

- Irreversibel-elastische Abformmaterialien:

z.B. Alginate und

Elastomere, klassifiziert entsprechend ihrer chemischen Basis in

Polysulfide,

K- Silikone,

A- Silikone und

Polyether.

Alginat ist ein irreversibles Hydrokolloid, wird mit Wasser angemischt und hauptsächlich zur Situationsabformung verwendet.

Allen *Elastomeren* gemein ist die Gummielastizität auf Grund ihrer flexiblen elastischen Moleküle. Nach dem Mischen der anfänglich plastischen Ausgangskomponenten (Basismaterial und Katalysator) kommt es zu einer chemischen (Vernetzung der einzelnen Moleküle zu Makromolekülen) und physikalischen (plastisch zu elastisch) Veränderung. Die Viskosität steigt, bis durch Vernetzung der irreversibel-elastische Zustand erreicht ist.

Bei den *Polysulfiden* (Thiokolen) entstehen die Makromoleküle durch Polykondensation unter Abspaltung von Wasser.

Die *Kondensationsvernetzten Silikone* (K-Silikone bzw. Polysiloxane) vernetzen ebenfalls durch Polykondensation, jedoch unter Abspaltung von Alkohol. Durch die Verdunstung des abgespaltenen Alkohols ergibt sich eine für K-Silikone charakteristische Kontraktion [39].

Additionsvernetzte Silikone (A-Silikone bzw. Vinylpolysiloxane) und *Polyether* vernetzen durch Polymerisationsreaktion ohne Abspaltung eines flüchtigen Nebenproduktes [39]. Die bei den K-Silikonem auftretende Abbindekontraktion wird deshalb bei den A-Silikonem vermieden.

2.1.2. Historische Entwicklung der Abformmaterialien

Als ältestes Abformmaterial wurde das *rote und weiße Siegelwachs* beschrieben. Das früher auch zum Abformen benutzte *Bienenwachs* hat heute nur noch historische Bedeutung.

Es folgten im letzten Jahrhundert die gebräuchlichen starren Abformmassen wie *Abformgips*, *Zinkoxid-Eugenolpasten* und thermoplastische *Kompositionsmassen*.

Die eigentliche Präzisionsabformung begann um 1925 mit den reversibel-elastischen *Hydrokolloiden*. Erstmals wurde die Darstellung von Unterschnitten möglich, allerdings verbunden mit erheblichem Aufwand (siehe 2.1.1.).

Zu Beginn der 50-er Jahre wurden mit den *Polysulfiden* erstmals elastomere Abformmaterialien, speziell für die Doppelmischtechnik, eingesetzt. Die Elastomere haben den Vorteil, daß sie auch bei Abformung von Unterschnitten in toto aus dem Mund genommen werden können (mit leichter elastischer Deformation beim Abziehen).

Wie bereits ausgeführt, hat die Entwicklung der Elastomere mit der Einführung der *Polysulfide (Thiokole)* begonnen und über die *kondensationsvernetzten Silikone (K-Silikone bzw. Siloxane)* 1955 und die *Polyether* 1965 zu den *additionsvernetzten Silikonen (A-Silikone bzw. Vinylpolysiloxanen)* 1975 geführt [10, 22, 38].

Als letzte Weiterentwicklung kamen Ende der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts die *hydrophilierten A-Silikone* auf den Markt [18, 29, 30].

Danach sind keine grundlegend neuen Materialgruppen mehr entwickelt worden. Markante Verbesserungen wurden jedoch durch optimierte Darreichungsformen, Verarbeitungserleichterungen (Mischsysteme) und Veränderungen in ihrem chemisch-physikalischen Verhalten (etwa den Benetzungseigenschaften) erreicht.

2.1.3. Anforderungen an die Abformmaterialien

Entsprechend dem Zweck der Abformung, der "Wiedergabe der natürlichen Verhältnisse im Mund", ergeben sich eine Reihe von Anforderungen an das ideale Abformmaterial [32]. Dieses sollte:

- Biologisch unbedenklich für Patienten, Zahnarzt und Personal sein.
- Im plastischen Bereich leicht verformbar und gut fließfähig sein.
- Feinste Details wiedergeben, abdruckscharf und akkurat sein.
- In möglichst kurzer Zeit so fest oder elastisch werden, daß es (ohne an Genauigkeit einzubüßen) als Gesamtabdruck entnommen werden kann.
- Die Schleimhaut und auch die Zahnhartsubstanz vollständig und vor allem topographisch richtig wiedergeben.
- Nicht am Zahn kleben.
- Volumenbeständig und formkonstant sein.
- Einfach und zeitsparend zu handhaben sein.
- Angenehm im Geschmack sein.
- Als Material und als Abdruck problemlos aufzubewahren sein.
- Eine größtmögliche Anwendungsbreite besitzen.
- Sich desinfizieren lassen, ohne die Materialeigenschaften zu verändern.
- Eine Gebrauchsanweisung mit klaren und einfachen Richtlinien haben.
- Verträglich mit dem Modellmaterial sein.
- Eine möglichst problemlose Umwandlung des Abdrucknegativs in ein originalgetreues (alle Details wiedergebendes) positives Modell gestatten.

2.2. Elastomere Abformmaterialien

Elastomere, insbesondere die in der vorliegenden Arbeit verwendeten *A-Silikone und Polyether*, zählen heute zu den präzisesten Abformmaterialien für eine vereinfachte und verbesserte Modellherstellung [9, 20, 37, 40].

Von Vorteil ist, daß sie auch bei der Abformung von Unterschnitten nach dem Abbinden in toto aus dem Mund genommen werden können (leichte elastische Deformation beim Abziehen).

2.2.1. Definition nach EN ISO 4823

In der ISO 4823 [9] sind die wichtigsten Anforderungen und Prüfungen zur Bewertung von zahnärztlichen elastomeren Abformmassen festgelegt. Diese müssen auch in der Gebrauchsanweisung angegeben werden:

- **Mischzeit:** Der Zeitraum vom ersten Kontakt zwischen den Komponenten einer durch Extrusion gemischten elastomeren Abformmasse bis zum Verlassen der Mischdüse als homogene Mischung.
- **Konsistenz:** Einteilung in Typen nach ihrer Fließeigenschaft, damit diese entsprechend ihrem vorgesehenen Anwendungszweck in geeigneter Weise fließfähig sind oder dem Fließen widerstehen.

Typ 0 *knetbar* (putty), *Typ 1* *schwerfließend* (heavy), *Typ 2* *mittelfließend* (regular) und *Typ 3* *leichtfließend* (light fast).

Die Fließeigenschaft (von *knetbar* bis *leichtfließend*) wird durch den Füllstoffgehalt bestimmt (SiO_2 , CaCO_3 , CaSO_4 u.a.). Je höher der Füllstoffanteil, desto höher ist die Viskosität und desto geringer ist die Schrumpfung.

- **Verarbeitungszeit:** Zeitraum ab Mischbeginn bis zu dem Zeitpunkt, an dem die gemischte Masse anfängt eine Konsistenz zu entwickeln, die der Herstellung eines Abdrucks mit den gewünschten Oberflächendetails und maßlicher Genauigkeit entgegensteht.

Nach ISO 4823 muß die Verarbeitungszeit mindestens 30 s länger sein als die zur Erreichung einer homogenen Mischung erforderliche Zeit (Mischzeit).

- **Wiedergabegenauigkeit**
- **Lineare Maßänderung**
- **Verträglichkeit mit Gips**
- **Elastische Rückstellung nach Verformung**
- **Verformung unter Druck.**

2.2.2. Benetzungseigenschaften

Die *Hydrophilie* hat eine besondere Bedeutung für das Benetzungsverhalten des Abformmaterials und somit für die Präzision der Abformung insbesondere auf feuchten oralen Oberflächen sowie im Sulkusbereich (zwischen Präparationsgrenze und Gingiva).

Aus dem griechischen übersetzt bedeutet Hydrophilie: dem Wasser zugeneigt, also das "Vermögen fester Substanzen, Flüssigkeiten die Möglichkeit zum Eindringen in kleinste Unebenheiten zu bieten" [18, 29].

Hydrophile Oberflächen sind also gut benetzbar, d.h. die Flüssigkeit kann sich auf der Oberfläche gut ausbreiten (Grenzflächenspannung gering). Die Bestimmung der Hydrophilie eines Abformmaterials kann mit Hilfe der Kontaktwinkelmessung an einem auf der Materialoberfläche liegenden Tropfen erfolgen (Abb. 1):

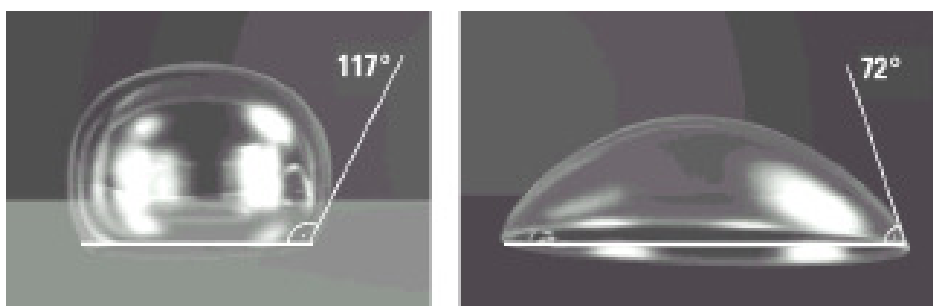


Abb. 1: Definition des Kontaktwinkels zwischen liegendem Tropfen und Materialoberfläche [27]

Abformmaterialien mit einem Kontaktwinkel $> 90^\circ$ werden als hydrophob , mit einem Kontaktwinkel $< 90^\circ$ als hydrophil charakterisiert.

Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang die vergleichende Untersuchung zur *"Quantifizierung der Benetzungseigenschaften von hydrophilierten A-Silikonen und Polyethern während der Applikationsphase"* von F. Rupp, H.-R. Lee, D. Axmann, M. Groten, J. Geis-Gerstorfer [30].

Inhalt der Untersuchung ist die direkte Quantifizierung der zeitabhängigen Hydrophilie von Abformmaterialien während der Abbindephase mit zeitlich hochauflösenden dynamischen Kontaktwinkelmessungen. Als Zeitabstände wurden 30, 60, 90, 120, 150 und 180 s nach Mischbeginn definiert. Mit dieser Methode wurden 8 hydrophilierte A-Silikone und 4 Polyether vergleichend untersucht.

Ein 8 µl Wassertropfen wird bei Raumtemperatur 23 ± 2 °C, 30 bis 180 s nach Mischbeginn, auf die polymerisierende Oberfläche platziert und die dynamische Veränderung der Tropfengeometrie mit Hilfe eines Benetzbarkeit-Messgerätes erfasst.

Zu unterscheiden sind die folgenden 3 zeitlichen Phasen [29, 30]:

- **Initiale Hydrophilie** - Phase des ersten Tropfenkontaktes mit der Materialoberfläche,
- **Kinetik der Hydrophilierung** - Phase der Tropfenabflachung,
- **Gleichgewichts-Hydrophilie** - Gleichgewichtskontur der Tropfen.

Konventionelle Elastomere (auch A-Silikone) sind aufgrund ihrer chemischen Struktur hydrophob, also schlecht mit Wasser benetzbar. Ihre Benetzbarkeit kann jedoch durch Zugabe grenzflächenaktiver Stoffe (Tenside oder Detergentien zur Herabsetzung der Grenzflächenspannung) gesteigert werden, d.h. sie werden hydrophiliert.

Bei der Untersuchung der Benetzungseigenschaften [30] waren zwar 6 der 8 untersuchten A-Silikone zu Beginn der jeweiligen Verarbeitungszeit hydrophil (initialer Kontaktwinkel bei 30s < 90 °), am Ende der jeweiligen Verarbeitungszeit jedoch nur noch 2.

Hydrophilierte A-Silikone haben also teilweise in der initialen Verarbeitungsphase eine hohe Hydrophilie, die aber bei den meisten Materialien im Verlauf der weiteren Verarbeitung wieder stark abnimmt [30]. Für die klinische Anwendung bedeutet dies eine zeitliche Beschränkung für die Verdrängung eines wässrigen Films bzw. Abbildung feinsten Oberflächenstrukturen.

Polyether haben während der gesamten Verarbeitungszeit konstant kleine Kontaktwinkel, d.h. eine chemisch bedingte konstant hohe Hydrophilie [30].

2.2.3. Fließeigenschaft

Gute Fließeigenschaft bedeutet genaue Abformung. Deshalb besteht die Forderung nach hervorragender Fließfähigkeit über die gesamte Verarbeitungszeit [10, 22, 39, 42].

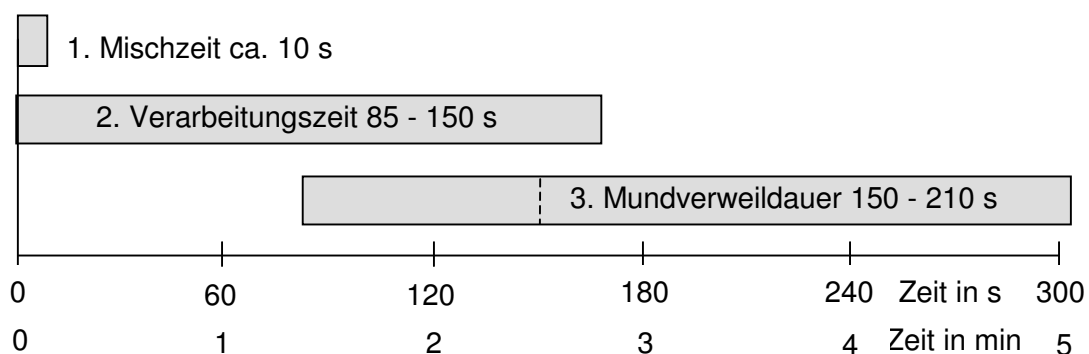


Abb. 2. Abbindezeit ab Mischbeginn

Die Verarbeitungszeiten der in der vorliegenden Arbeit verwendeten elastomeren Abformmaterialien (Abb. 2) liegen nach Herstellerangaben zwischen 85 und 150 s, die Mundverweildauer zwischen 150 und 210 s.

Die Abbindezeit ab Mischbeginn (Verarbeitungszeit + Mundverweildauer) liegt also bei 300 s bzw. 5 min, einem im Hinblick auf die klinische Anwendung akzeptablem Zeitraum.

2.2.4. Abbindeverhalten

Die Abbindereaktion der Elastomere ist kontinuierlich und beginnt mit dem Mischen von Basispaste und Katalysator. Entsprechend kontinuierlich verliert das Gemisch seine Fließfähigkeit und gewinnt seine gummielastischen Eigenschaften.

Das Einhalten der Verarbeitungszeit allein ist somit keine Garantie für die maximal mögliche Abformgenauigkeit. Entscheidend ist ein möglichst geringer Vernetzungsgrad bei der Abformung [25].

A-Silikone: Die Kettenmoleküle der einen Komponente der Basispaste besitzen endständige Vinylgruppen, die der zweiten Komponente seitliche H-Gruppen. In Gegenwart eines Katalysators (z.B. organische Platin-Verbindungen) bilden sich Äthylbrücken zwischen den einzelnen Silikon-Molekülen [22].

Polyether: Ausgang sind Copolymerisate aus Äthylenoxid und Tetrahydrofuran. Die Heterozyklen addieren sich unter Ringöffnung zu linearen Makromolekülen. Die endständigen OH-Gruppen werden mit einer ungesättigten Säure verestert, deren Doppelbindung mit Äthylenimin reagiert. Die Molekülketten besitzen schließlich endständige Aziridin-Gruppen. Dieser reaktionsfähige Ring wird durch katalytische Säuren (z.B. Benzolsulfonsäureester) geöffnet und durch Polyaddition zur Vernetzung veranlasst [22].

Volumenänderungen treten bei Elastomeren während des Abbindens, aber auch danach, auf:

- **Die Abbindekontraktion** ist wegen der geringen Reaktionsdichte relativ klein und beträgt bei A-Silikon bis -0,04 % und bei Polyethern bis -0,09 %. Ein Teil der Kontraktion kann zu Beginn der Vernetzung durch Nachfließen kompensiert werden [39].

- **Die thermische Kontraktion** während der Abkühlung von Mund- auf Raumtemperatur (Temperaturdifferenz ca. 15 °C) beträgt bei A-Silikon und Polyethern bis -0,18 % [39].

- **Elastische Verformung** beim Ablösen des Abformlöffels von der Zahnreihe. Nach Abschluß der elastischen Rückstellung (bis zu 3 Stunden) zeigt sich die bleibende Deformation [39].

Snap-Set-Abbindeverhalten bei Polyethern der Fa. 3M Espe [11] bedeutet, daß der Übergang zwischen plastischem und elastischem Zustand (am Ende der Verarbeitungszeit) des Materials in möglichst kurzer Zeit stattfinden soll. Bei A-Silikon kommt es dagegen oft zu Vorvernetzungen (elastische Anteile schon während der Verarbeitungszeit), der Übergang erfolgt über einen längeren Zeitraum (Abb. 3).

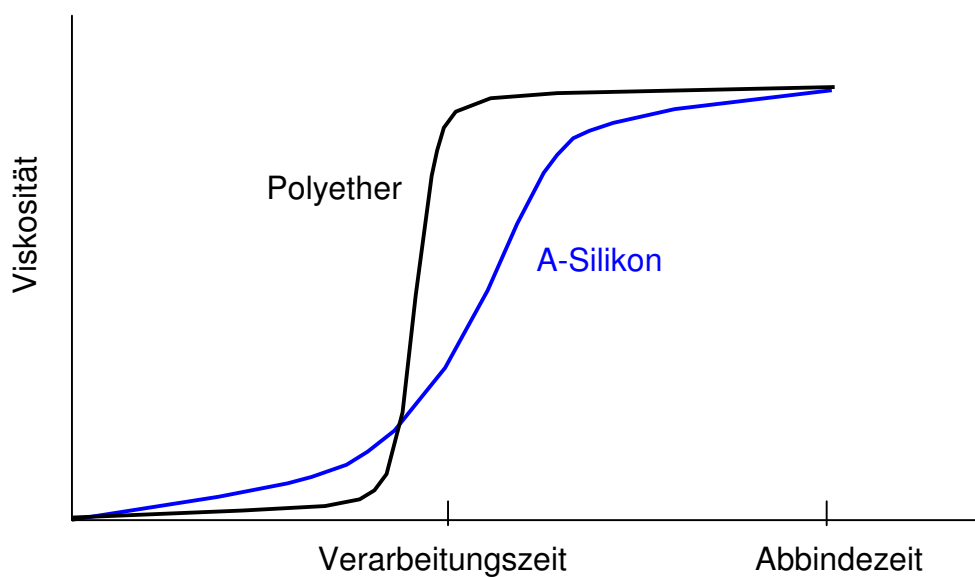


Abb. 3. Schematische Darstellung des Snap-Set-Abbindeverhaltens bei Polyethern der Fa. 3M Espe im Vergleich zu A-Silikon

2.2.5. Gummielastizität

Die gummielastischen Eigenschaften der Elastomere beruhen auf linearen Makromolekülen, auch als Molekülketten bezeichnet. Diese befinden sich im allgemeinen nicht in gestrecktem Zustand, sondern weisen eine unregelmäßige, verknäuelte Konfiguration (Abb. 4) auf. Demzufolge ist der Abstand zwischen den beiden Molekülen deutlich kleiner als die Gesamtlänge des Makromoleküls [22, 25].

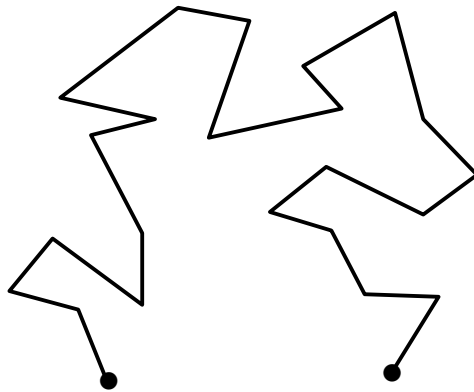


Abb. 4: Lineares Makromolekül in verknäueltem Zustand [22, 26]

Zur Vergrößerung des Abstands zwischen den beiden Molekülen (Streckung der Molekülkette) ist eine Kraft erforderlich, der eine Rückstellkraft auf Grund der Verknäuelungstendenz entgegen wirkt. Die zur Streckung benötigte Kraft ist auf Grund des geringen E-Moduls von Elastomeren gering, wogegen die Deformation groß ist [22, 26].

Die Polymerisation bewirkt die Entstehung eines dreidimensionalen Netzwerkes aus Makromolekülen (Abb. 5). Die Vernetzungsdichte, also die Zahl der Vernetzungspunkte bezogen auf die Gesamtlänge aller Molekülketten, bestimmt das Ausmaß der elastischen Eigenschaften [22, 26].

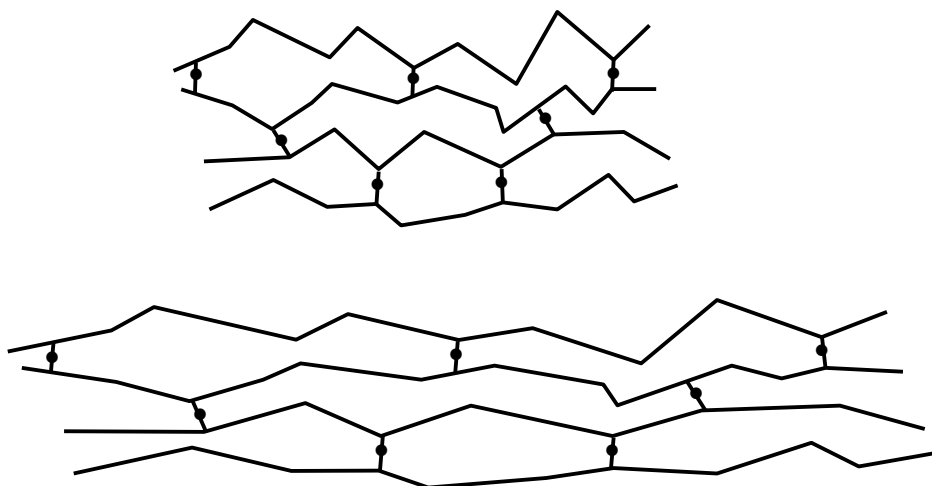


Abb.5: Vernetzte Makromoleküle in verknäueltem und gestrecktem Zustand [22, 26]

2.3. Prüfung der Fließeigenschaften - Rheometer

Rheologie ist die Lehre der Fließeigenschaften von Stoffen (Abformmaterialien) unter Einwirkung äußerer Kräfte [14, 31].

Rheometer werden Geräte genannt, die die viskoelastischen Eigenschaften, im Bereich zwischen Flüssigkeiten und Festkörpern, messen.

Viskosimeter sind Geräte, die ausschließlich zum Messen des viskosen Fließverhaltens von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen) Verwendung finden [31].

2.3.1. Wirkungsweise der Rheometer

Die rheologische Untersuchung von viskoelastischen Abformmaterialien mit Hilfe eines Rheometers beruht auf dem Prinzip des durch Schubspannungen hervorgerufenen Fließens des untersuchten Stoffes. Energie muß kontinuierlich zugeführt werden, um das Fließen des Stoffes aufrechtzuerhalten.

Bei der Untersuchung von Stoffen treten immer zwei Arten von Reaktionen auf, ein viskoses und ein elastisches Verhalten:

- *Viskosität* ist der Widerstand einer Flüssigkeit gegen den erzwungenen, irreversiblen Ortswechsel ihrer Volumenelemente. Nach Isaac Newton erzeugt eine konstante Kraft an einem Körper eine konstante, proportionale Beschleunigung in Richtung der Kraft [14].

Die Deformationsenergie (z.B. Schubspannung) wird in der Flüssigkeit in Wärme umgesetzt, d.h. sie wird nicht zurückgewonnen, wenn die wirksame Kraft entfällt.

- *Elastizität* eines Festkörpers bedeutet nach dem Hooke'schen Gesetz, daß die Kraft z.B. Schubspannung proportional zum Produkt aus Elastizität und Verformung des Stoffes ist [14].

Die Energie der Deformation wird vollständig zurückgewonnen, wenn der Körper entlastet wird.

Im Rheometer befindet sich die zu prüfende Masse sinnvollerweise zwischen **zwei Vorrichtungsf lächen** [31]:

- *Bewegliche Fläche zum Aufbringen der Schubspannung* und
- *feste Fläche*.

Die im Spalt zwischen den beiden Flächen befindliche Masse kommt durch Bewegen (Aufbringen der Schubspannung) der beweglichen Fläche zum Fließen. Die maximale Fließgeschwindigkeit erhält man an der Grenzschicht zur bewegten Fläche, die Fließgeschwindigkeit 0 an der Grenzschicht zur stationären Fläche. Der Geschwindigkeitsabfall in der Schichtenströmung zwischen den beiden Flächen wird als *Geschwindigkeitsgefälle* bezeichnet und dient als *Maß für das Fließverhalten*.

Im Laufe der letzten Jahrzehnte haben sich u. a. die folgenden Vorrichtungen zur Erzeugung und Messung des Fließens bewährt:

- Fließen zwischen zwei parallelen, ebenen Platten (ebene Bewegung).
- Fließen im Spalt zwischen einem Kegel und einer ebenen Platte (Rotation).
- Fließen im Spalt zwischen zwei planparallelen runden Platten (Rotation).

Durch Überlagerung einer oszillierenden Bewegung (oszillationsrheometrische Untersuchung) ist es möglich, den rein viskosen Anteil und die elastisch gespeicherte Energie getrennt festzustellen.

2.3.2. Bauarten der Rheometer

Die oben aufgeführten Grundlagen der Rheometer sollen den Überblick über deren historische Entwicklung erleichtern [14, 24, 25, 31]:

Cure-Meter (Wilson 1964) zur Bestimmung des Abbindeverhaltens von Abformmaterialien. Gemessen wird die abnehmende, hin- und hergehende Bewegung einer perforierten Platte (auf die Abformmasse gedrückte, bewegliche Vorrichtungsf läche), vom Mischbeginn bis zum Abbinden. Wilson hat auch die Temperaturabhängigkeit der Abbindezeit festgestellt. Die

realistischsten Ergebnisse werden bei einer Materialtemperatur von 33 °C (entsprechend der im Mund erreichten Temperatur) erhalten [36].

Reciprocating Rheometer (Wilson 1966) für Abformmaterialien mit großem Viskositätsbereich und temperaturabhängigem Abbindeverhalten [37]. Gegenüber dem Cure-Meter sind bessere Regelung der aufgetragenen Schubspannung (elektrischer Antrieb) und verbesserte Erfassung der abnehmenden hin- und hergehenden Bewegung der perforierten Platte mit dem Prüfmaterial von Vorteil. Weiterhin ist die Temperierung der Vorrichtung mit Wasser von Leitungswassertemperatur bis 90 °C möglich.

Schoenmakers' Method (1970) zur Bestimmung der Verarbeitungs- und Abbindezeit in zwei getrennten Arbeitsgängen mit senkrechter Belastung der zu prüfenden Masse. Das Ende der Verarbeitungszeit wird erreicht, wenn die gemessene Materialdicke bei einer fortlaufenden Messung erstmals doppelt so dick ist wie zu Beginn der Messung. Zur Ermittlung der Abbindezeit wird das zu prüfende Material in einem Wasserbad alle 2 min mit einer Stahlkugel belastet. Bei einer Deformation von 0,15 mm für Silikonmaterial und 0,25 mm für Polyethermaterial ist die Abbindezeit erreicht [20].

Diskus-Test (1979) zur Bestimmung der Konsistenz (niedrig, mittel, hoch). Eine bestimmte Menge der zu prüfenden Masse wird zwischen zwei Glasplatten unter jeweils festgelegter Last zu einer Scheibe (Diskus) gepresst. Zuordnung der Abformmassen nach Diskusdurchmesser und -dicke.

Haake Stress-Rheometer zur Bestimmung rheologischer Meßdaten (Viskosität/Zeit-Kurven) arbeitet mit Platte/Platte Anordnung, konstanter Schubspannung und einer überlagerten oszillierenden Bewegung (geringe Amplitude bei entsprechender Frequenz).

Durch die oszillationsrheometrische Untersuchung ist es möglich, den rein viskosen Anteil und die elastisch gespeicherte Energie getrennt festzustellen.

Die untere, feste Fläche kann auf Temperaturen zwischen 0 und 45 °C eingestellt werden

Rotationsrheometer u.a. von HAAKE sind seit Anfang der 70-er Jahre bekannt. Entsprechend den Meßsystemen unterscheidet man zwischen Kegel/Platte und Platte/Platte:

- *Controlled Stress Rheometer (CS-Rheometer)* geben eine definierte Schubspannung vor und messen das resultierende viskositäts-proportionale Geschwindigkeitsgefälle.
- *Controlled Rate Rheometer (CR-Rheometer)* geben ein definiertes Geschwindigkeitsgefälle vor und messen die resultierende viskositäts-proportionale Schubspannung.

Oszillierendes Rheometer (1977) ist die Bezeichnung für ein CS-Rheometer mit oszillierender Schubspannung und rotierender Kegel/Platte Anordnung [24].

Abb. 6 zeigt den unterschiedlichen Verlauf der gesamten Arbeitszeit bzw. Abbindezeit von 3 verschiedenen Abformmaterialien, vom Mischbeginn bis zur vollständigen Abbindung. Vor allem die unterschiedlichen Verarbeitungs- und Mundverweilzeiten lassen sich in den Rheogrammen deutlich darstellen.

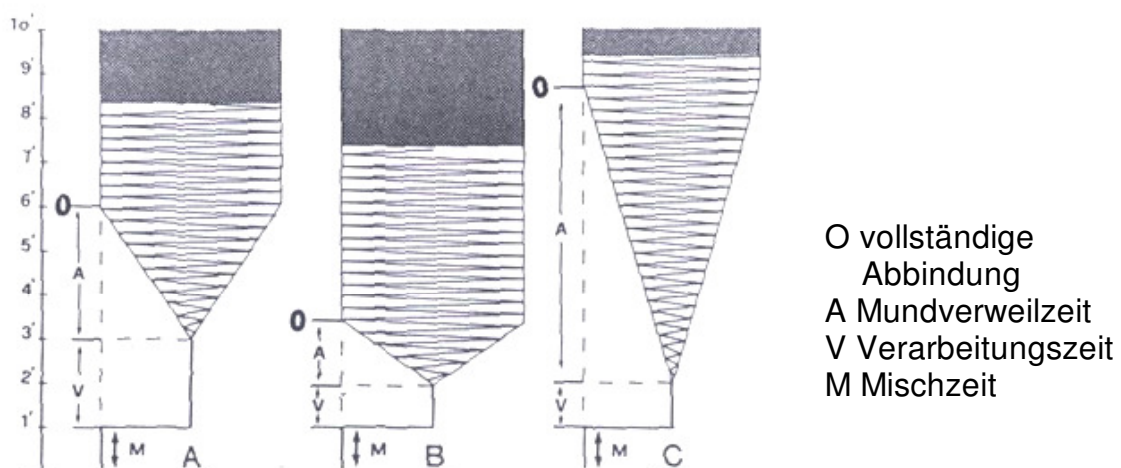


Abb.6: Oszillierendes Rheometer - Rheogramme von 3 theoretisch konstruierten Abformmaterialien A-C mit unterschiedlich zusammengesetzter Abbindezeit [24]

Displacement Rheometer (1993) [2] nach McCabe ist eine Modifikation des Reciprocating Rheometers von Wilson mit Entkopplung des elektrischen Antriebs für die bewegliche Vorrichtungsfäche und somit eine Vorstufe zur ISO 4823 (2001).

Haifischflossentest (Shark-Fin) der Fa. Espe zur Messung der Spaltfließfähigkeit des Abformmaterials unter Druck [10, 12]. Die Vorrichtung ist wesentlicher Bestandteil des Versuchsaufbaus der vorliegenden Arbeit und wird in den folgenden Kapiteln im Einzelnen besprochen.

2.3.3. Prüfgerät nach EN ISO 4823 (2001):

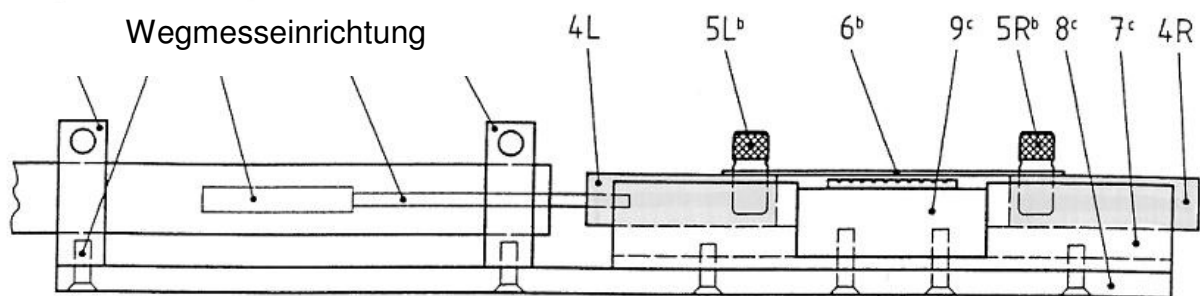


Abb. 7: Gerät zur Prüfung der Verarbeitungszeit nach ISO 4823 (2001) [9]

Nach Beendigung der Mischzeit werden die folgenden Arbeitsschritte innerhalb von 55 s durchgeführt (Versuchsdurchführung):

- Eine Materialprobe der Abformmasse von ca. 2 ml wird mittig auf die mit Rillen versehene Fläche des Prüfblocks 9 aufgebracht.
- Die Lochplatte 6 wird auf die Mitte der Materialprobe gedrückt, bis sie an beiden Enden mit ihrer Unterseite die oberen Flächen der Polymergleitblöcke 4 berührt und die gemischte Masse durch mindestens 28 der vorhandenen 36 Löcher herausgedrückt wird.
- Durch Einsetzen der Arretierstifte 5 (Kopplung von Gleitblöcken und Lochplatte) werden die Versuchsvorbereitungen abgeschlossen.
- Die eigentliche Prüfung der Verarbeitungszeit beginnt 60-90 s nach Mischbeginn. *Durch Fingerdruck auf den Gleitblock 4 wird die Lochplatte alle*

15 s um 0,25 mm verschoben (Abb. 8). Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis das Prüfdiagramm zum ersten Mal Anzeichen einer elastischen Rückstellung aufweist.

- Als Verarbeitungszeit wird die Zeitspanne angegeben, die bis 15 s vor dem ersten Anzeichen einer elastischen Rückstellung der Materialprobe verstrichen ist (Abb. 8).

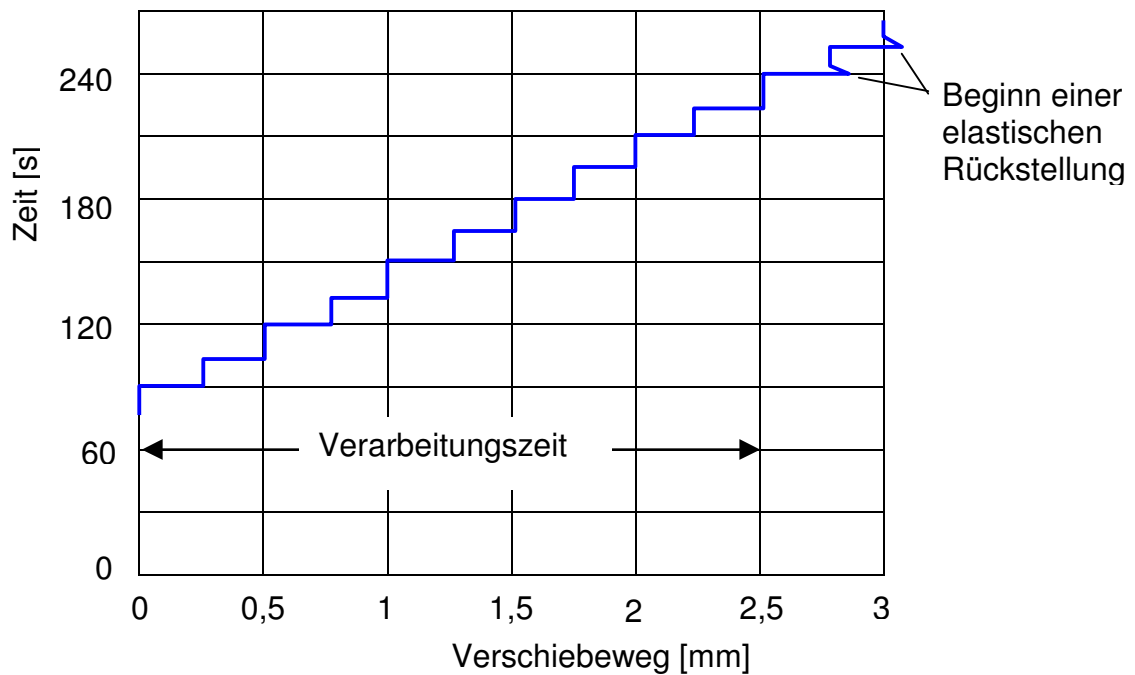


Abb. 8: Prüfdiagramm zur Bestimmung der Verarbeitungszeit nach EN ISO 4823

2.4. Abformmethoden

Die Abformmethoden [10, 18, 19, 21, 39, 43] haben, gemeinsam mit den Abformmaterialien, eine zentrale Bedeutung für die Genauigkeit der zahnärztlichen Abformung bei der Übertragung der Zahn- bzw. Gebißgeometrie vom Zahnarzt zum Zahntechniker.

Die geeignete Abformmethode ist entsprechend der klinischen Situation und Abformaufgabe auszuwählen.

2.4.1. Übersicht Abformmethoden

Eine zweckmäßige Gliederung der Abformmethoden erfolgt nach der Abformtechnik und der zeitlichen Vorgehensweise [19]:

- **Einphasenabformung, einzeitig:** 1 Abformung mit 1 Material mittlerer Viskosität, z.B. Polyether für Abformung bei supra- und äquigingivaler Präparationsgrenze.

Zur gleichen Zeit wird der Löffel beschickt und der präparierte Zahn mit dem gleichen Material umspritzt. Unmittelbar nach dem Umspritzen wird der gefüllte Löffel im Mund platziert und das verbundene Material bindet gemeinsam ab.

- **Zweiphasenabformung, einzeitig:** Abformung mit 2 Materialien unterschiedlicher Viskosität und gleicher chemischer Basis (Doppelmischabformung), z.B. A-Silikone für Abformung bei supra- und äquigingivaler Präparationsgrenze.

Zur gleichen Zeit wird der Löffel mit einem höher viskosen Material beschickt und der präparierte Zahn mit dem leichtfließenden Material (gleicher chemischer Basis) umspritzt. Unmittelbar nach dem Umspritzen wird der Löffel mit dem höher viskosen Material im Mund platziert und die verbundenen zwei Phasen binden gemeinsam ab.

- **Zweiphasenabformung, zweizeitig:** Sukzessive Abformung mit 2 Materialien unterschiedlicher Viskosität und gleicher chemischer Basis (Korrekturabformung), z.B. A-Silikone für Abformung bei supra- und subgingivaler Präparationsgrenze.

Die erste Abformung wird mit einem höher viskosen Material im Löffel durchgeführt. Nach der Entnahme aus dem Mund wird der Abdruck sorgfältig beschnitten um Unterschnitte zu beseitigen und genügend Abflußmöglichkeiten für das Material bei der zweiten Abformung zu schaffen.

Bei der zweiten Abformung (Korrekturabformung) wird der Zahnkranz im Löffel mit einem leichtfließenden Material (gleicher chemischer Basis) aufgefüllt und ggf. der präparierte Zahn zusätzlich umspritzt. Durch Wiedereinsetzen des Löffels wird das Korrekturmaterial bis auf eine dünne Korrekturschicht verdrängt, verbindet sich mit dem abgebundenen Erstmaterial und bindet ebenfalls ab.

2.4.2. Historische Entwicklung der Abformmethoden

Die *einzeitige Spritzenabformung* (1937) wurde zunächst mit Hydrokolloiden, später dann mit Polysulfiden durchgeführt.

Ab 1956 setzte sich die *zweizeitige Zweiphasenabformung* durch - Erstabformung mit einer thermoplastischen Kompositionsmasse, Zweitphase mit einer elastischen Masse.

1962 wurde erstmals auch für die Erstabformung eine elastische Masse verwendet mit dem Vorteil, daß zwei elastische Massen sich besser miteinander verbinden.

Die *Korrekturabformung* in ihrer heutigen Form, mit einer ersten und zweiten Phase aus Silikon, wurde 1965 eingeführt.

Ab 1969 folgte dann die *Weiterentwicklung der Methoden* durch Verbesserung des Dimensionsverhaltens der Abformung (Beschneiden des Erstabdrucks, Anlegen von Abflußkanälen/-rinnen in der Erstabformung und direktes Umspritzen der Stümpfe mit dünnflüssigem Silikon).

Die Verarbeitungszeit kann durch Kühlen des Materials vor der Anwendung und die Verwendung von Langzeitkatalysatoren [18] verlängert werden.

Anfang der neunziger Jahre setzte sich die Erkenntnis durch, daß die individuelle klinische Situation am Patienten [10] in entscheidendem Maße für die Präzision einer Abformung bestimmend ist.

Das anhaltende Bemühen der Hersteller zum Thema Abformmaterialien- und methoden zeigt, daß auch beim heutigen Stand der Abformung an einer weiteren Optimierung gearbeitet wird.

3. Ziele der Arbeit

Vorrangiges Ziel dieser Arbeit ist die Inbetriebnahme und Erprobung des von der Sektion Medizinische Werkstoffkunde und Technologie, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde des Universitätsklinikums Tübingen entwickelten Versuchsaufbaus zur zeitaufgelösten Ermittlung der Fließfähigkeit von leichtfließenden A-Silikonem und Polyethern mit Hilfe eines rechnergestützten Weg-Messprogramms. Der in Kapitel 4.2.2. ausführlich beschriebene Versuchsaufbau integriert und ergänzt die Original-Versuchsvorrichtung der Firma 3M Espe zur Bestimmung der Fließfähigkeit eines Abformmaterials mit Hilfe des Haifischflossentests (Kapitel 4.2.1.).

Beim Haifischflossentest dient die entstandene Flossenhöhe als Maß für die Fließfähigkeit. Ein weiteres Ziel wird sein, ob sich die aus der Literatur ersichtlichen Erkenntnisse trotz unterschiedlicher Untersuchungsbedingungen und Abformmaterialien mit den Erkenntnissen dieser Untersuchung vergleichen und bestätigen lassen.

Die rechnergestützte Messung des Stempelweges mit Hilfe des vorliegenden Versuchsaufbaus soll nach Möglichkeit die Handvermessung der beim Haifischflossentest entstehenden Flossenhöhe (Schieblehre) ersetzen bzw. ergänzen.

Die Fließfähigkeit soll in Form von Materialkurven - Stempelweg in Abhängigkeit von der Zeit ab Messbeginn (jeweils 30 bis 180 s nach Mischbeginn) - dargestellt werden. Die zeitlich gestaffelte Versuchsreihe zu den 6 verschiedenen Zeiten 30, 60, 90, 120, 150 und 180 s nach Mischbeginn entspricht im unteren Bereich dem Zeitraum, in dem der Zahnarzt den Abdruck (innerhalb der Verarbeitungszeit) genommen haben sollte.

Die Zeiten im oberen Bereich bis 180 s liegen bewusst außerhalb der Verarbeitungszeit, um diese eventuell auf diesem Wege bestimmen zu können. Zum Erreichen dieses weiteren Zieles kann eine Begrenzung dieser Zeit ab Mischbeginn notwendig sein:

- Einerseits durch Definition einer Mindestflossenhöhe,

- andererseits durch Festlegung einer Mindesteinsinkzeit beim Stempelweg, beides unter Bezug auf die klinische Situation.

Im Hinblick auf den großen Einfluß der Ausgangs- bzw. Lagertemperatur der verwendeten Abformmaterialien auf ihre Fließfähigkeit werden die Untersuchungen bei den 4 Materialtemperaturen 18, 21, 25 und 28 °C mit vortemperierter Abformmasse durchgeführt. Bis 25 °C entspricht dies den von allen Herstellern zugelassenen Temperaturbereichen.

Entsprechend der Zahntemperatur bei geöffnetem Mund (vor der Abformung) wird die Haifischflossen-Versuchsvorrichtung der Firma 3M Espe auf 33 °C vorgewärmt.

Die Ergebnisse der Untersuchung zur *Quantifizierung der Benetzungseigenschaften von hydrophilierten A-Silikonem und Polyethern während der Applikationsphase* [19] sollen im Hinblick auf eine mögliche Verbindung zwischen Benetzungs- und Fließeigenschaften der verwendeten Abformmaterialien untersucht werden.

Vorgesehen ist auch die Überprüfung des von der Firma 3M Espe für Ihr Polyether Impregum Garant L DuoSoft angegebenen "Snap-Set-Abbindeverhaltens".

4. Material und Methoden

4.1. Verwendete Abformmaterialien

Die vorliegende, vergleichende Untersuchung wurde mit 4 Elastomeren verschiedener Hersteller durchgeführt.

Verwendet wurden 3 A-Silikone und 1 Polyether mit einer Konsistenz Typ 3 leichtfließend (Tab. 1).

Tab. 1: Verwendete Elastomere

Handelsname	Konsistenz	Hersteller	Elastomer	Verarbeitungszeit *	Mundverweildauer
Affinis light body	Typ 3 leichtfließend	Coltène Whaledent	A-Silikon	85 s	210 s
Aquasil Ultra LV	Typ 3 leichtfließend	Dentsply	A-Silikon	150 s	150 s
Flexitime Correct Flow	Typ 3 leichtfließend	Heraeus Kulzer	A-Silikon	150 s	150 s
Impregum Garant L DS	Typ 3 leichtfließend	3M Espe	Polyether	120 s	210 s

Handelsname	Mischungsverhältnis	Lineare Maßänderung (Schrumpf)	Rückstellung nach Verformung	Verformung unter Druck
Affinis light body	1 : 1	0,23 %	99,7 %	3-4 %
Aquasil Ultra LV	1 : 1	<0,5 %	>98,0 %	3-4 %
Flexitime Correct Flow	1 : 1	0,11 %	99,6 %	4,6 %
Impregum Garant L DS	2 : 1	0,3 %	98,8 %	3-4 %

Angaben laut Hersteller nach ISO 4823

* Zeit ab Mischbeginn, d.h. erster Kontakt der Komponenten in der Mischdüse

Die Auswahl der 4 verwendeten Elastomere erfolgte in Anlehnung an die Publikation *"Quantifizierung der Benetzungseigenschaften von hydrophilierten A-Silikonem und Polyethern während der Applikationsphase"* von F. Rupp, H.-R. Lee, D. Axmann, M. Groten, J. Geis-Gerstorfer [30].

Aus der Werkstofftable dieser Publikation wurden 3 A-Silikone im Hinblick auf ihre unterschiedlichen hydrophilen Eigenschaften ausgewählt, sowie 1 Polyether mit der größten, gleichbleibenden Hydrophilie während der ersten 180 s nach Anmischen.

Tab. 2: Kontaktwinkel zu Beginn und zu Ende der Verarbeitungszeit

Handelsname	Elastomer	Initialer Kontaktwinkel * zu Beginn der Verarbeitungszeit	Initialer Kontaktwinkel * zu Ende der Verarbeitungszeit
Affinis light body	A-Silikon	75°	84°
Aquasil Ultra LV	A-Silikon	78°	128°
Flexitime Correct Flow	A-Silikon	93°	111°
Impregum Garant L DS	Polyether	58°	58°

* < 90° hydrophil, > 90° hydrophob

Tab. 2 führt zu folgenden Aussagen:

- *Affinis* bleibt bis zum Ende der Verarbeitungszeit hydrophil, liegt jedoch nahe der 90°-Grenze zu hydrophob.
- *Aquasil* ist zu Beginn schwach hydrophil, zu Ende der Verarbeitungszeit stark hydrophob.
- *Flexitime* ist über die ganze Verarbeitungszeit hydrophob.
- *Impregum* ist über die ganze Verarbeitungszeit gleichbleibend stark hydrophil.

Im Verlauf der Arbeit wird versucht einen möglichen Zusammenhang zwischen den Benetzungseigenschaften und den Fließeigenschaften festzustellen.

Alle verwendeten Elastomere basieren auf zwei Komponenten (Basis- und Katalysatormasse), welche in Doppelkartuschen mit insgesamt 50 ml abgefüllt sind.

Eine exakte Dosierung von Basismaterial und Katalysator (im vorgegebenen Mischungsverhältnis) wird mit Hilfe einer Mischpistole (Dispenser, Abb. 9) erreicht.

Durch Betätigen der Mischpistole wird der Doppelstempel mechanisch in die Doppelkartusche gedrückt und presst die beiden Komponenten in die aufgesteckte und durch 90°-Drehung arretierte Mischdüse.

Zur Überwachung des einwandfreien und vollständigen Mischvorganges in der spiraligen Mischdüse haben Basismaterial und Katalysator kontrastierende Farben.



Abb. 9: Mischpistole mit Doppelkartusche und Mischdüse

Leichtfließende Typ-3-Materialien auf A-Silikon- und Polyether-Basis sind bei der Abformung von Vorteil, allerdings kann die damit verbundene geringere Shore-Härte (Härteprüfung nach DIN 53505) des ausgehärteten Materials bei der Modellerstellung zu Abformungenauigkeiten führen.

4.2. Verwendete Prüfmethode

Die Firma 3M Espe hat mit dem Haifischflossen-Test eine Methode entwickelt, mit der die Fließfähigkeit eines Abformmaterials unter Druck bestimmt werden kann. Einerseits soll der Stempel das Einsinken des Zahnes in die Abformmasse, andererseits soll der Spalt im Stempel (Haifischflosse) das Eindringen der Abformmasse in den Sulkus (Spalt zwischen Zahn und Zahnfleisch) simulieren.

Wie bereits erwähnt wurde die Original-Vorrichtung für den Haifischflossen-Test in den vorliegenden Versuchsaufbau, kombiniert mit einer Heizvorrichtung und einer berührungslosen Wegmessung, integriert.

4.2.1. Haifischflossen-Test

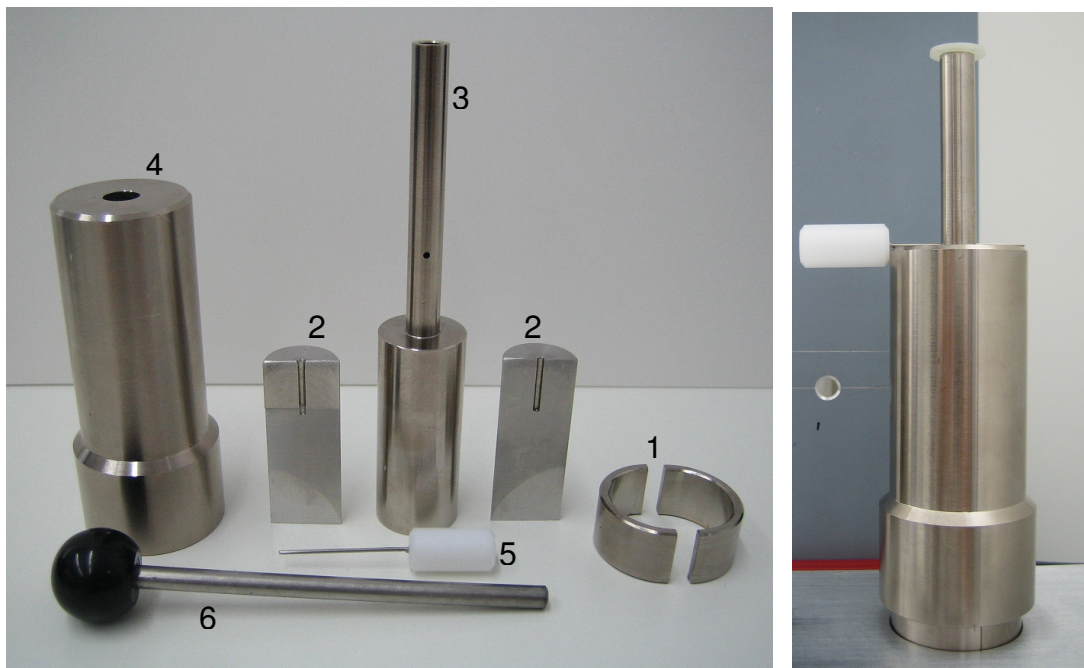


Abb. 10: Übersicht Einzelteile und Zusammenbau der Haifischflossen-Testvorrichtung

Die Original-Versuchsvorrichtung der Firma 3M Espe (Abb. 10) besteht aus:

- Grundplatte mit einer zylindrischen Vertiefung (30 mm \varnothing , 5 mm Tiefe) zur Aufnahme der Ringform (1) für das Abformmaterial.
- Ringform (1) aus zwei identischen Halbschalen (zur späteren Entformung),

14 mm hoch, welche in die zylindrische Vertiefung der Grundplatte passt und ca. 8 ml Abformmasse fasst.

- Kolbeneinsatz (2), welcher zwecks späteren Entformung zweiteilig ist und im Inneren einen keilförmigen 1 mm breiten Spalt hat. Der in diesem Spalt entstehende Prüfkörper hat die Form einer Haifischflosse.
- Kolben mit Führungsstift (3). Der Kolben dient zur Aufnahme des Kolbeneinsatzes (2) und der Führungsstift zur Führung in Rohr (4). Kolben und Kolbeneinsatz bilden in zusammengebautem Zustand den Stempel und haben ein Gesamtgewicht von 147 g.
- Arretierungsstift (5) wird in die Bohrung des Führungsstiftes (3) gesteckt und hält den Stempel über der Ringform (1) bis zum Versuchsbeginn.
- Rohr (4) dient zur Führung des Stempels und der zwischen Stempel und Rohr aufsteigenden, vom Stempel verdrängten Abformmasse.
- Stift (6) dient zum Herausdrücken des Kolbeneinsatzes (2) aus dem Kolben (3).

Zur Durchführung des Haifischflossen-Tests wird die Ringform (1) in die Vertiefung der Grundplatte gesteckt und mit Abformmaterial gefüllt.

Nach Zusammenbau des Stempels mit dem Rohr (4) wird dieser durch den Arretierungsstift (5) in Ausgangsstellung gehalten. Diese Baugruppe wird auf die Ringform (1) gestellt. Durch Herausziehen des Arretierungsstiftes (5) aus dem Führungsstift (3) wird der Versuch gestartet und der Stempel sinkt durch sein Gewicht von 147 g in die Abformmasse. Durch den entstehenden, leichten Druck dringt die Masse u.a. in den Spalt im Inneren des Stempels ein. Der dabei entstehende Prüfkörper hat die Form einer Haifischflosse.

Zur Vermessung der Höhe der Haifischflosse wird die Vorrichtung wieder in ihre Einzelteile zerlegt. Anschließend kann die freigelegte Flosse mit einer Schieblehre vermessen werden. Je höher die Flosse, desto größer ist die Fließfähigkeit des Abformmaterials

4.2.2. Versuchsaufbau



Abb. 11: Versuchsaufbau

Die Original-Versuchsvorrichtung der Fa. 3M Espe wurde im Versuchsaufbau (Abb. 11) integriert. Der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit entsprechend verfügt der Versuchsaufbau über zwei zusätzliche Einrichtungen:

- **Heizplatte** mit zylindrischer Vertiefung zur Aufnahme der Ringform auf einem Heizgerät mit digitaler Temperaturanzeige.
- **Lasermessgerät** zur Messung des Einsink-Weges des Stempels auf einem Träger montiert.

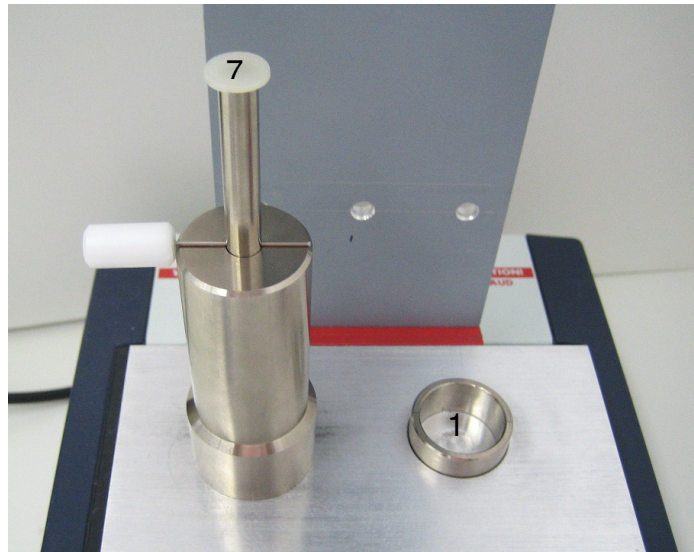


Abb. 12: Aufheizung von Ringform (1) und zusammengebauter Vorrichtung

Mit Hilfe der **Heizplatte** Typ DRI-BLOCK DB-20 der Firma Techne (Abb. 12) wurde die Vorrichtung für den Haifischflossen-Test auf 33 ± 1 °C aufgeheizt, entsprechend der Temperatur an der Abformstelle bei geöffnetem Mund. Diese Festlegung der Versuchstemperatur ist von Bedeutung, sowohl für die Simulation der oralen Bedingungen als auch im Hinblick auf das temperaturabhängige Verhalten des Abformmaterials.

Die gewünschte Temperatur von 33 °C wurde mit Hilfe eines Temperatur-Messgerätes an der Ringform (1) zur Aufnahme des Abformmaterials einjustiert. Aufgrund des auftretenden Wärmeverlustes ergab sich für das Heizgerät eine Einstelltemperatur von 34,6 °C.

Abweichend von der Darstellung in Abb. 12 wurde der Arretierungsstift, zur besseren Aufheizung des Stempels, entfernt. Dadurch stand der Stempel direkt auf der Heizplatte.

Mit einem **Lasermessgerät** Typ RF600 der Firma Disynet GmbH, Brüggen [13] erfolgte die Messung des Einsink-Weges des Stempels im 100 ms-Takt. Das Gerät ist u.a. für berührungslose Wegmessung entwickelt worden.

Die Integration dieser Messmethode in den Versuchsaufbau erfolgte in der Sektion Medizinische Werkstoffkunde & Technologie des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde des Universitätsklinikums Tübingen und ist Grundlage dieser Arbeit.

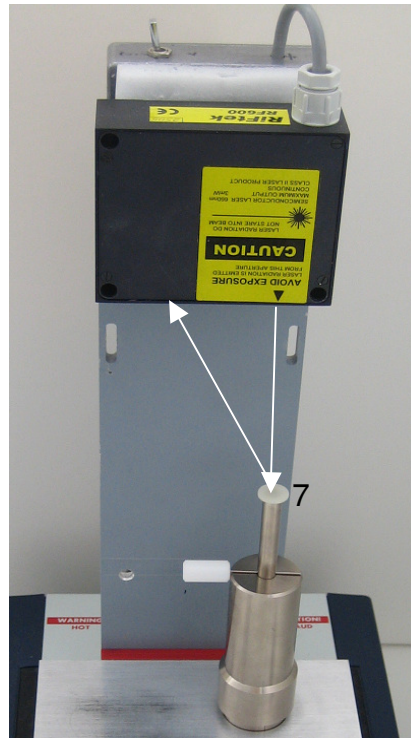


Abb. 13: Berührungslose Wegmessung

Die Laserwegsensoren (Abb. 13) arbeiten nach dem Triangulationsprinzip. Der Laserstrahl wird im Gerät durch eine Linse auf das Reflektorplättchen (7) fokussiert. Der von dort reflektierte Strahl wird wiederum im Messgerät durch eine Linse auf einen Sensor fokussiert und die Daten über einen Rechner als Abstand des Reflektorplättchens vom Messgerät in mm ausgewertet.

Bei der Herstellung des Versuchsaufbaus bzw. des Trägers für das Lasermessgerätes wurde der Mindestabstand von 80 mm zwischen Gerätunterseite und Reflektorplättchen (7) berücksichtigt. Bei der Versuchsdurchführung ist der Messbereich, hier der Stempelweg, von 50 mm zu berücksichtigen.

Im vorliegenden Fall wurde der Nullpunkt der Lasermessung auf die Ausgangsstellung des arretierten Stempels justiert.

5. Durchführung der Untersuchung

Erster Schritt ist die Herstellung der Haifischflossen bei gleichzeitiger Messung des Stempelweges der Versuchsvorrichtung.

Entsprechend der Zielsetzung der Arbeit wurden die Versuche zeitlich gestaffelt zu den **6 verschiedenen Zeiten** 30, 60, 90, 120, 150 und 180 s nach Mischbeginn gestartet.

Die Messungen wurden ausserdem bei den **4 Materialtemperaturen** 18, 21, 25 und 28 °C mit vortemperierter Abformmasse durchgeführt.

Von jedem Abformmaterial wurden zur Bildung von Mittelwerten 5 Messungen pro untersuchter Zeit und Temperatur durchgeführt.

5.1. Herstellung der Prüfkörper (Haifischflossen)

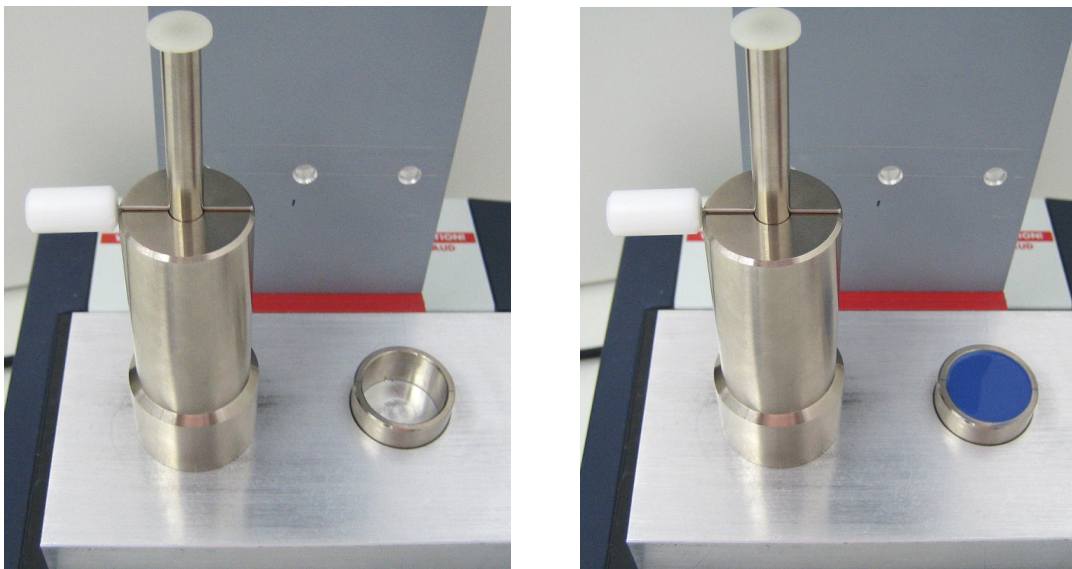


Abb. 14: Vorrichtung mit leerer (l) und gefüllter (r) Ringform

Vor Versuchsbeginn wurde die Vorrichtung für den Haifischflossen-Test zusammengebaut, aufgeheizt und der Stempel mit dem Arretierungsstift in Ausgangsstellung gehalten (Abb.14). Das Reflektorplättchen wurde auf den Führungsstift gesteckt. Weiterhin wurde die Stoppuhr mit Countdown-Funktion auf den jeweiligen gewählten Messbeginn (30, 60, 90, 120, 150 oder 180 s nach Mischbeginn) voreingestellt.

Versuchsbeginn war das erstmalige Betätigen der Mischpistole (Mischbeginn) und gleichzeitiges Starten der voreingestellten Stoppuhr.

Durch weiteres Betätigen der Mischpistole wurden etwa 8 ml Abformmasse zur Befüllung der Ringform injiziert. Die Mischspritze wurde zur Vermeidung von Luftblasen in die Ringform gesteckt. Nach Füllung der Ringform wurde die Oberfläche mit einem planen Spatel geglättet und eventuell überschüssiges Material abgestrichen.

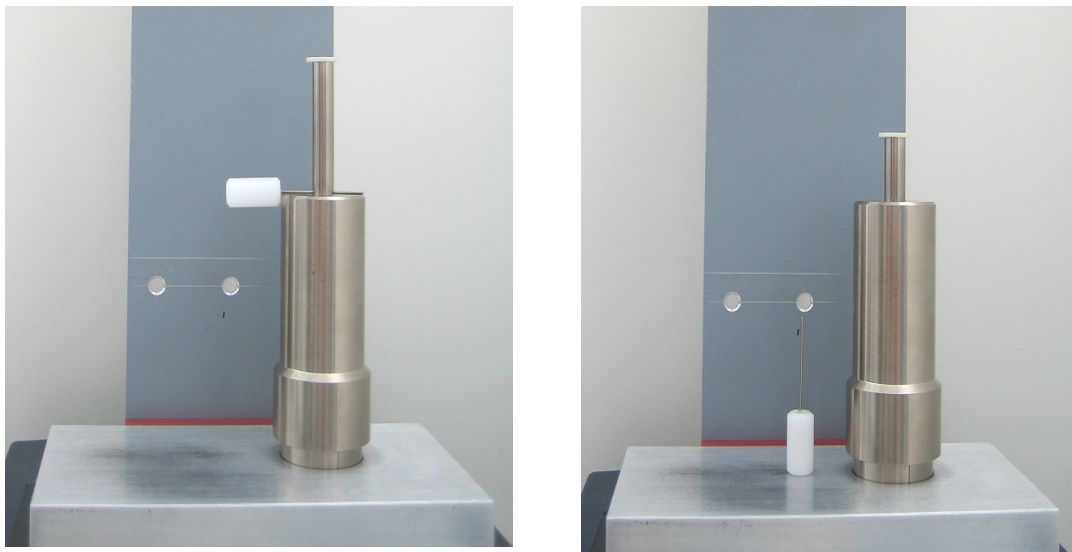


Abb. 15: Vorrichtung mit arretiertem (l) und gelöstem (r) Stempel

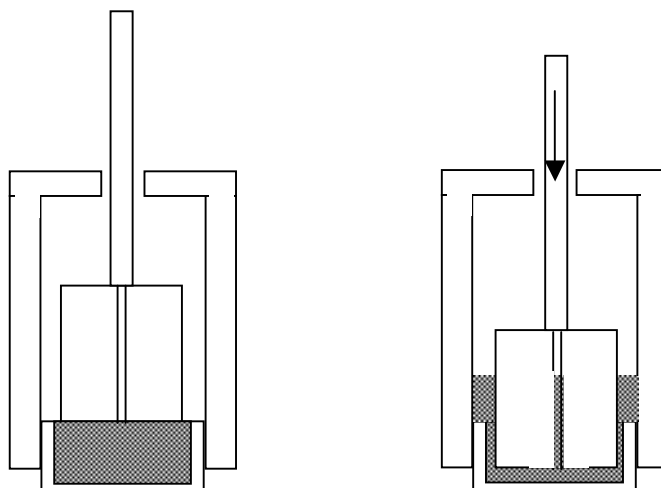


Abb. 16: Schematische Darstellung, Einsinken des Stempels und Aufsteigen der Abformmasse im Spalt des Stempels (Haifischflosse) sowie zwischen Rohr und Stempel [42]

Die zusammengebaute Vorrichtung mit Stempel (Stempelgewicht 147 g) wurde auf die Ringform gestellt und der Laser eingeschaltet. Nachdem der Countdown (Stoppuhr) abgelaufen war (30, 60, 90, 120, 150 oder 180 s nach Mischbeginn) wurde der Laser gestartet und unmittelbar danach der Arretierungsstift aus dem Führungsstift herausgezogen (Abb. 15 und 16). Diese geringe zeitliche Verzögerung von ca. 0,5 s ist auch aus den Stempelweg/Zeit-Diagrammen ersichtlich. Der Stempel fiel zunächst ca. 10 mm bis zum Auftreffen auf der Masse in der Ringform und konnte dann langsam in die Masse einsinken. Die verdrängte Masse stieg in dem ringförmigen Raum zwischen Stempel und Rohr und außerdem natürlich im Haifischflossenspalt des Kolbeneinsatzes auf. Als Abbindezeit für die Masse wurden 4-5 min vorgesehen, danach wurde der Laser ausgeschaltet.

Zur Demontage wurde die Vorrichtung aus der Heizplatte gehoben, das Reflektorplättchen entfernt und der Stempel aus dem Rohr gedrückt (Abb. 17). Der nächste Schritt war das Entfernen der Ringform und das Herausdrücken des Kolbeneinsatzes aus dem Kolben mit dem dafür vorgesehenen Stift.

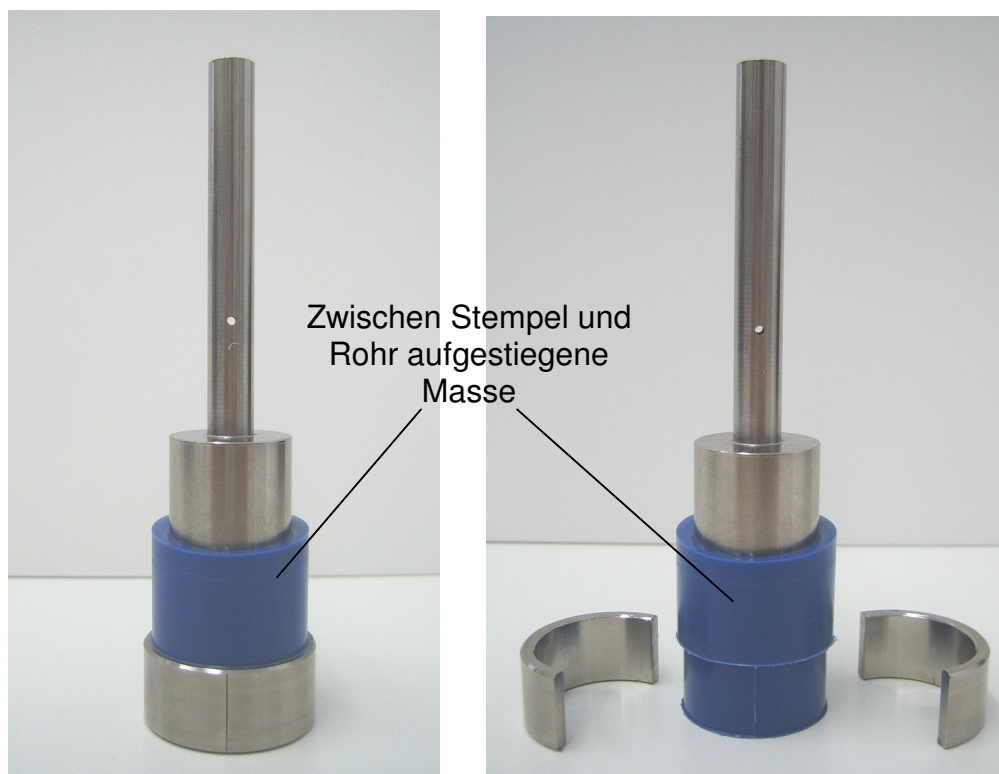


Abb. 17: Verschiedene Schritte der Demontage

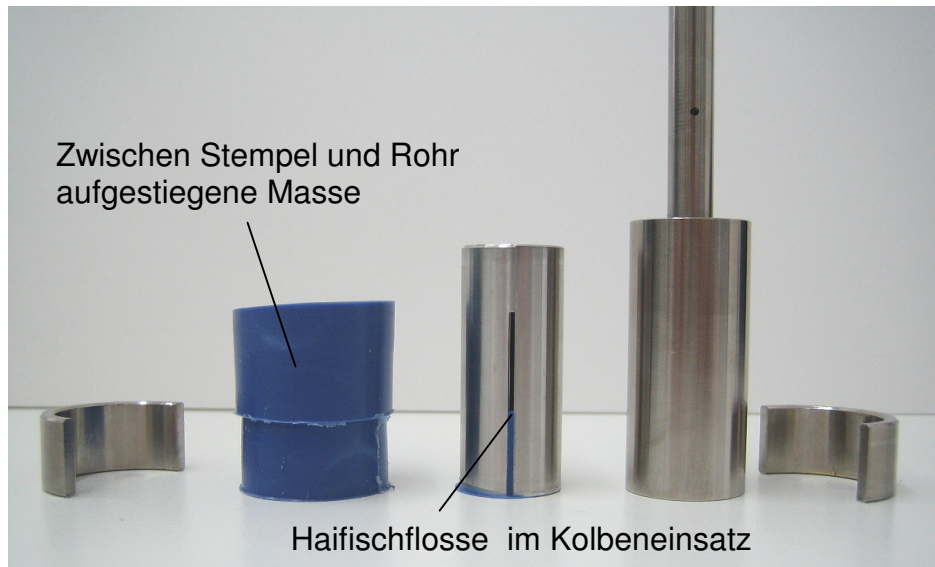


Abb. 18: Verschiedene Schritte der Demontage

Anschließend wurden die Hälften des Kolbeneinsatzes getrennt (Abb. 18).

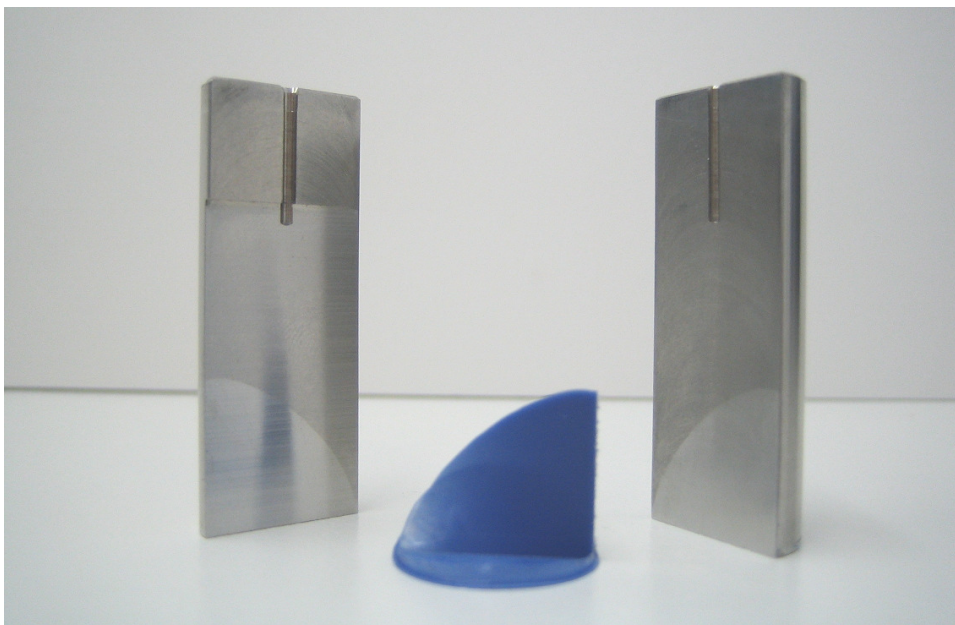


Abb. 19: Entformte Haifischflosse

Die Höhe der Haifischflosse konnte mit einer Schieblehre vermessen werden (Abb 19).

5.2. Messung des Stempelweges

Ergänzend zu der bereits bekannten Herstellung der Haifischflossen ist Inhalt dieser Arbeit die Messung des Stempelweges mit Hilfe der Laser-Wegmessung und Auswertung mit Hilfe der Excel- und Originprogramme. Die kontinuierliche Messung alle 100 ms ermöglicht die Darstellung des Stempelweges in einer sogenannten "Materialkurve".

Die in Abb. 20 dargestellte typische Materialkurve (eines noch fließfähigen Materials) zeigt den Stempelweg in Abhängigkeit von der Zeit, d.h. die Stempelgeschwindigkeit. Die Kurve entspricht der Fließfähigkeit des Abformmaterials und gilt für einen bestimmten Zeitpunkt (Messbeginn) nach Mischbeginn sowie eine bestimmte Temperatur.

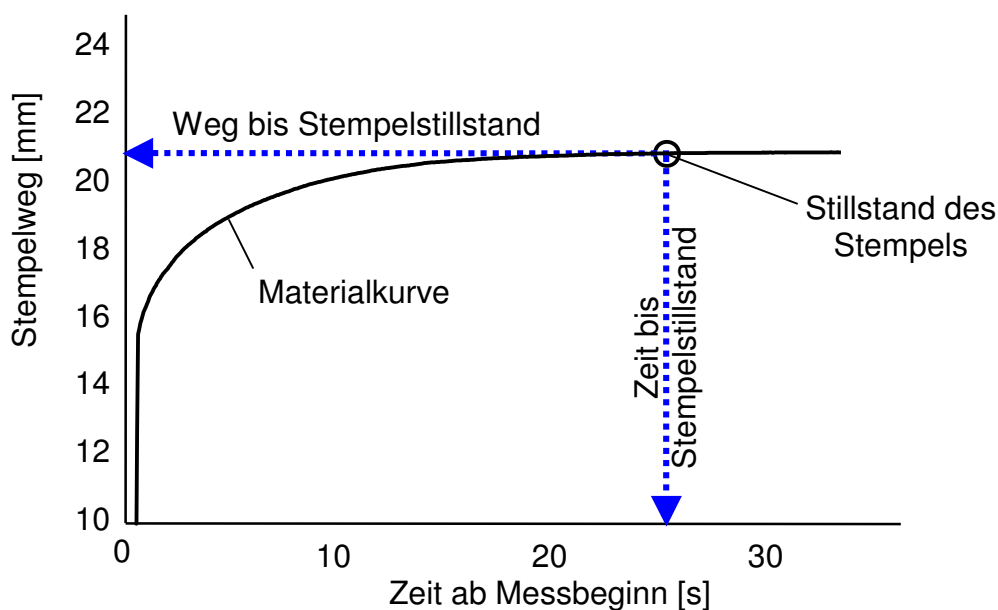


Abb. 20: Stempelweg in Abhängigkeit von der Zeit ab Messbeginn für ein bestimmtes Abformmaterial bei einer Temperatur

Der Stempelweg (y-Achse) beginnt bei dem Wert 10 mm, welcher dem Leerweg des Stempels bis zum Auftreffen auf der Abformmasse in der Ringform entspricht. Der maximale Stempelweg beträgt ca. 24 mm (Auftreffen des Stempels auf dem Boden der Ringform). Der Stempel kann also einen maximalen Einsinkweg von ca. 14 mm zurücklegen.

Die Materialkurve beginnt auf der Zeitachse (x-Achse) mit einer zeitlichen Verzögerung von ca. 0,5 s, hervorgerufen durch Laserstart und anschließendes manuelles Herausziehen des Arretierungsstiftes aus dem Führungsstift.

Die Materialkurve lässt sich in drei Bereiche einteilen:

- Zu Messbeginn fast senkrechter Kurvenanstieg, d.h. hohe Stempelgeschwindigkeit.
- Nach einigen Sekunden kontinuierlich abflachende Kurve mit asymptotischer Annäherung an den Gleichgewichtszustand (Stempelstillstand).
- Stempelstillstand entsprechend dem fortgeschrittenen Abbindeprozeß oder durch Auftreffen des Stempels auf dem Boden der Ringform (bei besonders fließfähigem Material).

Die Materialkurve in Abb. 20 ermöglicht sowohl einen qualitativen Vergleich der Abbindedynamik (Material-/ Abbindeverhalten), als auch die quantitative Feststellung des Punktes des Stempelstillstandes.

Der Punkt des Stempelstillstands lässt sich sowohl nach der Wegachse (Stempelweg in mm bis zum Stempelstillstand) als auch nach der Zeitachse (Zeit ab Messbeginn in s bis zum Stempelstillstand) auswerten.

Dieser Punkt des Stempelstillstandes nach Messbeginn, jeweils 30, 60, 90, 120, 150 oder 180 s nach Messbeginn, wird somit Grundlage aller weiteren Auswertungsmethoden unter Kapitel 5.3.

Beim ursprünglichen Haifischflossen-Test wurde zwar auch der Endzustand nach Abschluß des Abbindevorgangs festgestellt, jedoch nur durch manuelle Vermessung der Flossenhöhe.

5.3. Auswertungsmethoden

Nach erfolgter Versuchsdurchführung und Darstellung des Stempelweges in Abhängigkeit von der Zeit ab Messbeginn in Materialkurven erfolgen weitere Schritte zur Veranschaulichung der Versuchsergebnisse.

5.3.1. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe

In der Abb. 21 sind am Beispiel eines leichtfließenden Abformmaterials der Weg bis zum Stempelstillstand aus der Lasermessung (oberer Teil) und die gemessene Flossenhöhe (unterer Teil) gegenübergestellt. Die Kurven ergeben sich aus den Werten der 6 Messungen 30, 60, 90, 120, 150 und 180 s nach Mischbeginn.

Aus dem oberen Teil des Diagramms ist auf der Achse des Stempelweges (links) bei 10 mm das Ende des Leerweges ersichtlich, außerdem bei ca. 24 mm der Anschlag (Auftreffen des Stempels auf dem Boden der Ringform).

Im unteren Teil auf der y-Achse der Flossenhöhe (rechts) ist eine Skalierung von 15 mm vorgesehen. In Anlehnung an die klinischen Anforderungen im Sulkus (Spalt zwischen Zahn und Zahnfleisch) wird der Grenzwert für eine Mindestflossenhöhe von 2 mm gefordert.

Bei einer subgingivalen (unterhalb des Zahnfleischrandes) Präparation von 1 mm entspricht dies einer zusätzlichen Fahne des Abdruckmaterials von 1 mm unterhalb der Präparationsgrenze.

Bei einer äquigingivalen (auf gleicher Höhe des Zahnfleischrandes) Präparation kann eine Mindestflossenhöhe von 1 mm ausreichen um dem Zahntechniker die Präparationsgrenze deutlich genug darzustellen.

Daraus resultiert, daß bei Flossenhöhen im Diagramm unterhalb dieser Grenzwerte (2 bzw. 1 mm) keine ausreichende Fließfähigkeit, je nach vorliegender klinischer Situation, mehr vorhanden ist. Gleiches gilt für die nach dem Schnittpunkt von Flossenhöhe-Kurve und Grenzwert liegende Zeit nach Mischbeginn

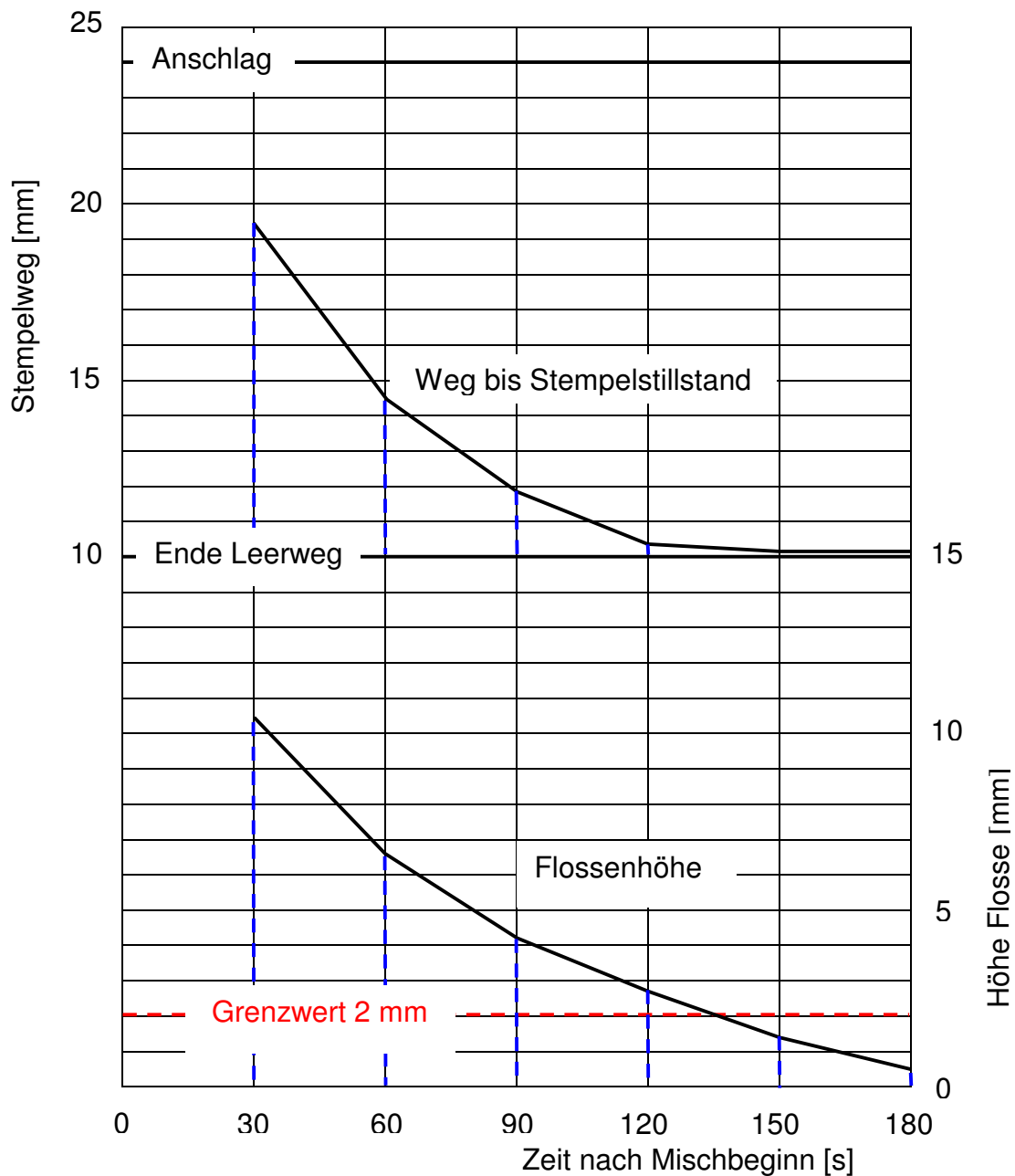


Abb. 21: Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn

5.3.2. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe

Wie aus Abb. 22 ersichtlich, besteht kein direkter, proportionaler Zusammenhang zwischen dem Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe. Dies ist begründet in der konstruktiven Auslegung der Vorrichtung für den

Haifischflossen-Test (Abb. 16). Die vom Stempel verdrängte Abformmasse kann, im Sinne einer Stromteilung, zwei Wege nehmen:

- In den Ringspalt zwischen Stempel und Rohr, sowie
- in den Spalt des Stempels (Haifischflosse).

Zur Veranschaulichung dieser Stromteilung werden die Fließquerschnitte, mit den an der Vorrichtung ermittelten Abmessungen, berechnet:

- Stempelquerschnitt $\pi \times d^2 / 4 = \pi \times 21^2 / 4 = \mathbf{346 \text{ mm}^2}$ einerseits und
- Ringspaltquerschnitt $\pi \times (d_a^2 - d_i^2) / 4 = \pi \times (27^2 - 21^2) / 4 = \mathbf{226 \text{ mm}^2}$ sowie
- Flossenquerschnitt (Dreieck) Spaltbreite $1 \times$ Spaltlänge $18 / 2 = \mathbf{9 \text{ mm}^2}$ anderseits.

Auf Grund des geringen Flossenquerschnitts fließt die vom Stempel verdrängte Abformmasse fast ausschließlich in den Ringspalt zwischen Stempel und Rohr. Entsprechend dem Verhältnis Stempel- / Ringspalt-querschnitt von $346 / 226 = 1,53$ würde sich dann bei einem Stempelweg von 10 mm eine Höhe der Masse im Ringspalt von 15,3 mm ergeben.

In der Abb. 22 ist, am Beispiel eines leichtfließenden Abformmaterials, der berechnete (bei Vernachlässigung des Haifischflossen-Spaltes) Verlauf der Höhe der Masse im Ringspalt proportional zum Stempelweg dargestellt.

In Wirklichkeit ist jedoch die geringe, in den Haifischflossen-Spalt fließende Abformmasse zu berücksichtigen. Um das Volumen dieser Masse verringert sich die Höhe der Masse im Ringspalt.

Im folgenden Ergebnisteil dieser Arbeit wird aufgezeigt, daß die Strömung in den bzw. im Haifischflossen-Spalt nicht proportional zum Stempelweg ist, sondern ein eigenes, reproduzierbares Strömungsverhalten hat:

- Bei großem Stempelweg (noch gut fließfähiges Material kurz nach Mischbeginn) ist die Flossenhöhe kleiner als die berechnete Höhe der Masse im Ringspalt.

- Bei kleinem Stempelweg ist die Flossenhöhe größer als die berechnete Höhe der Masse im Ringspalt.

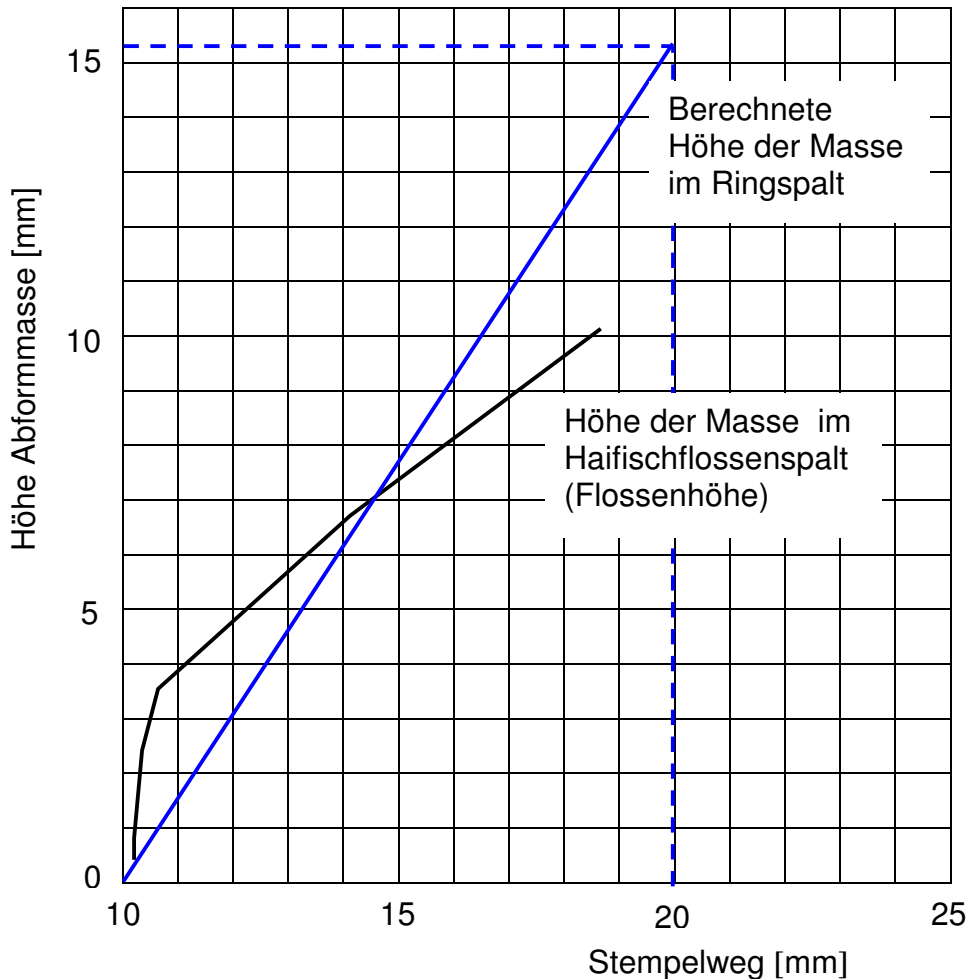


Abb. 22: Höhe der Masse im Ringspalt und Flossenhöhe in Abhängigkeit vom Weg bis Stempelstillstand

5.3.3. Zeit bis Stempelstillstand

Dem zurückgelegten Weg bis zum Stempelstillstand entspricht, am Beispiel eines leichtfließenden Abformmaterials (Abb. 23), eine Zeit bis zum Stempelstillstand.

Entsprechend der Mindestflossenhöhe von 2 mm (Abb. 21 aus 5.3.1.) wird beim Stempelweg eine Mindesteinsinkzeit von 2 s gefordert. Klinisch entspricht dies

beim Abformen in etwa der Zeit für das Eindrücken der Zähne in das Abformmaterial im Löffel.

Unterhalb dieses Grenzwertes von 2 s im Diagramm ist keine ausreichende Fließfähigkeit des Materials mehr vorhanden. Gleiches gilt für die nach dem Schnittpunkt von Kurve und Grenzwert liegende Zeit nach Mischbeginn.

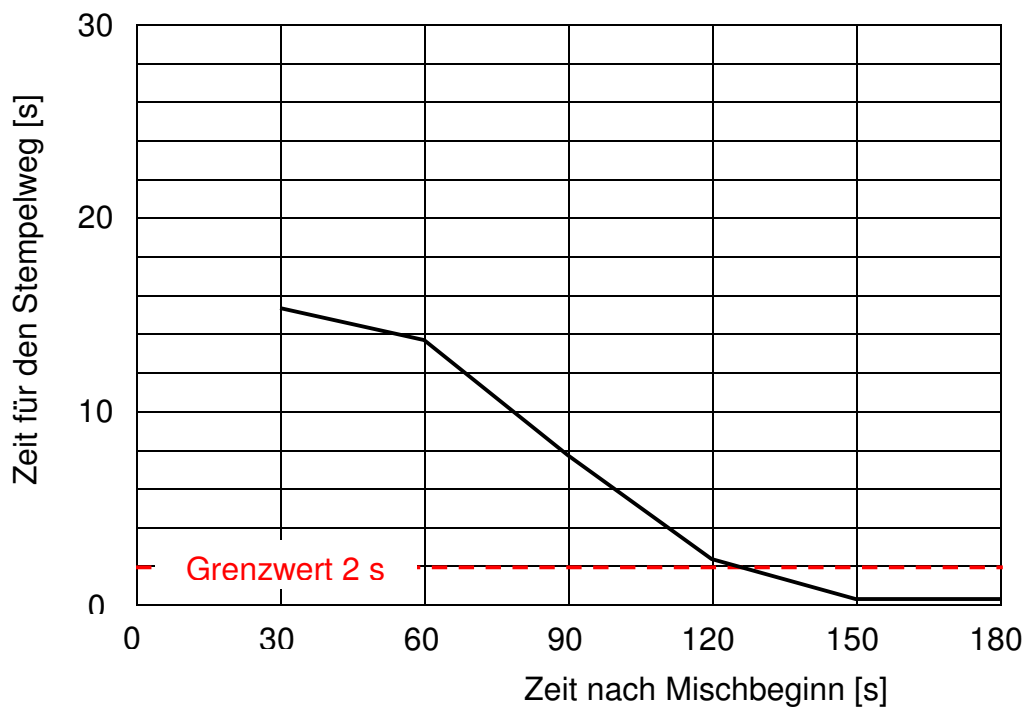


Abb. 23: Zeit bis Stempelstillstand in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn

6. Ergebnisse

6.1. Affinis Light Body

6.1.1. Stempelweg über Zeit ab Messbeginn

Dargestellt sind in den Abb. 24-27 zunächst die Messergebnisse in Form der unter Kapitel 5.2. besprochenen Materialkurven als Mittelwerte aus jeweils 5 Messungen.

Wie bereits ausgeführt wurden die Versuche zeitlich gestaffelt zu den **6 verschiedenen Zeiten** 30, 60, 90, 120, 150 und 180 s nach Mischbeginn gestartet.

Die Messungen wurden außerdem bei den **4 Materialtemperaturen** 18, 21, 25 und 28 °C mit vortemperierter Abformmasse durchgeführt.

Grundsätzlich hat das Material mit zunehmender Temperatur einen kürzeren Stempelweg bis zum Stempelstillstand,

z. B. bei Messbeginn 30 s nach Mischbeginn für 18 °C 19,7 mm,

21 °C 18,6 mm,

25 °C 18,5 mm,

28 °C 17,5 mm,

bei Messbeginn 60 s nach Mischbeginn für 18 °C 14,6 mm,

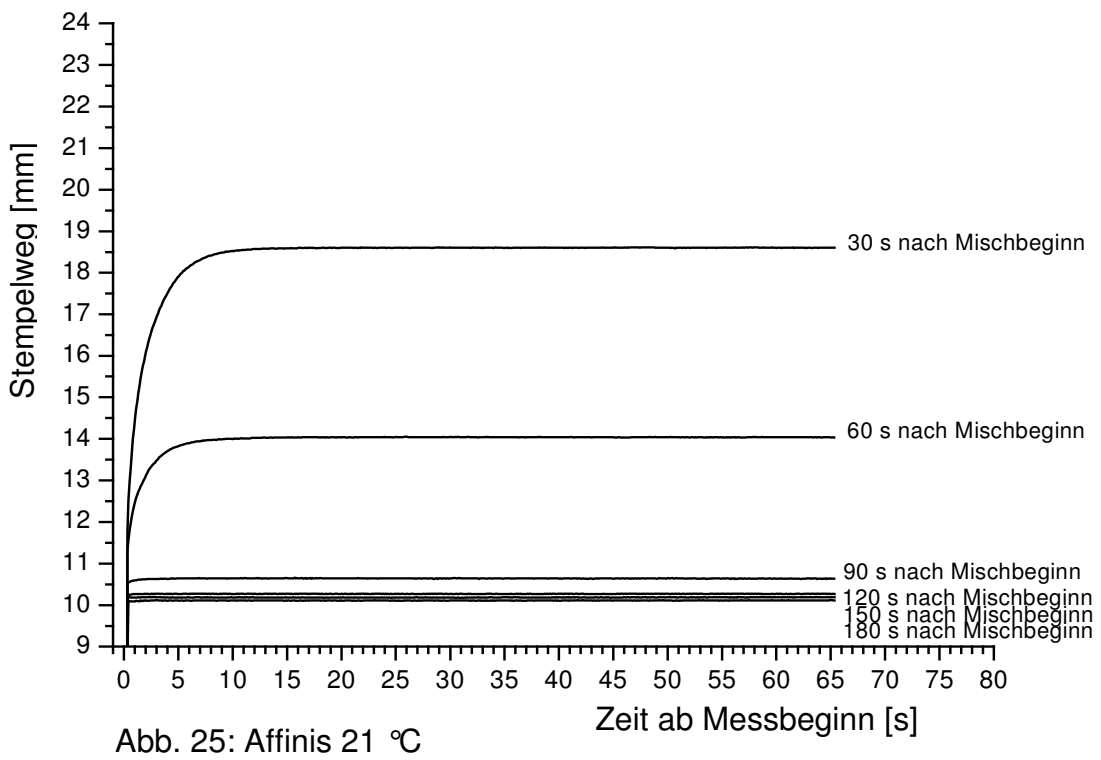
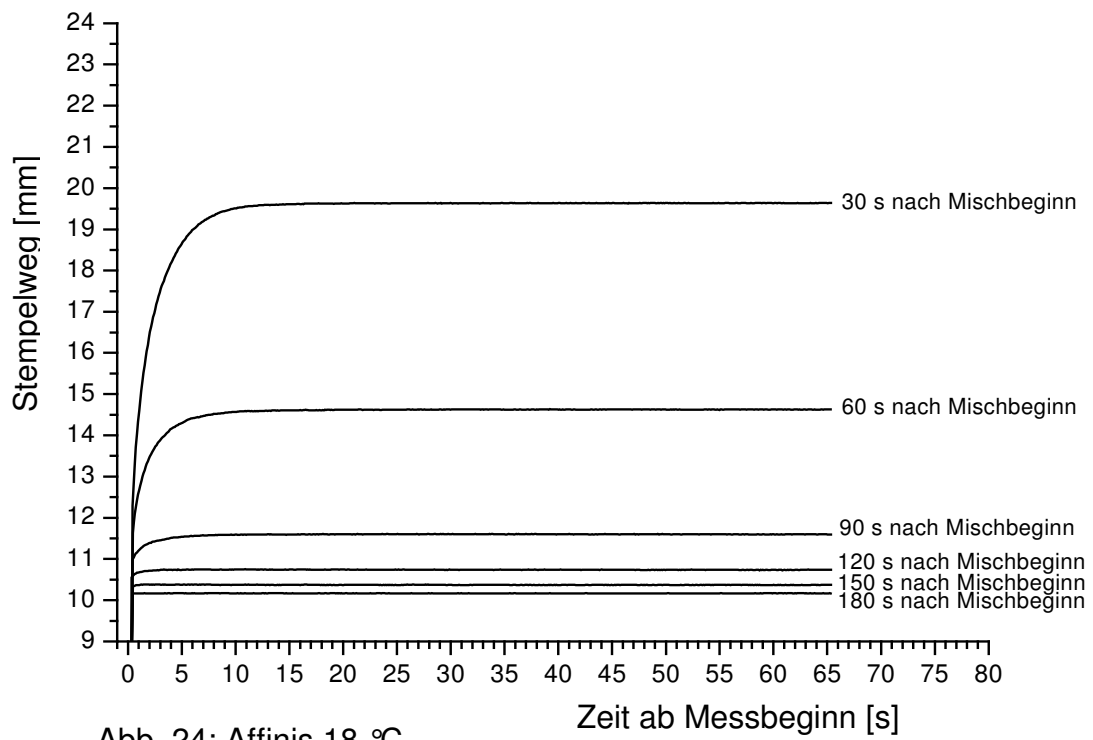
21 °C 14,0 mm,

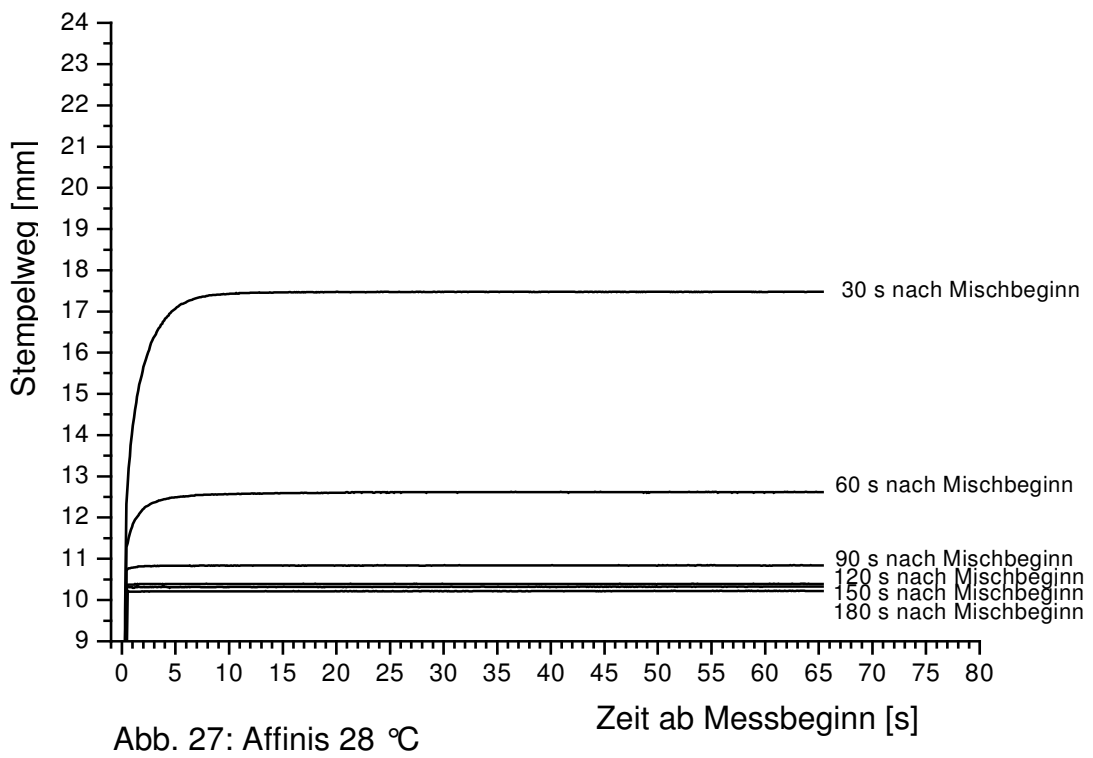
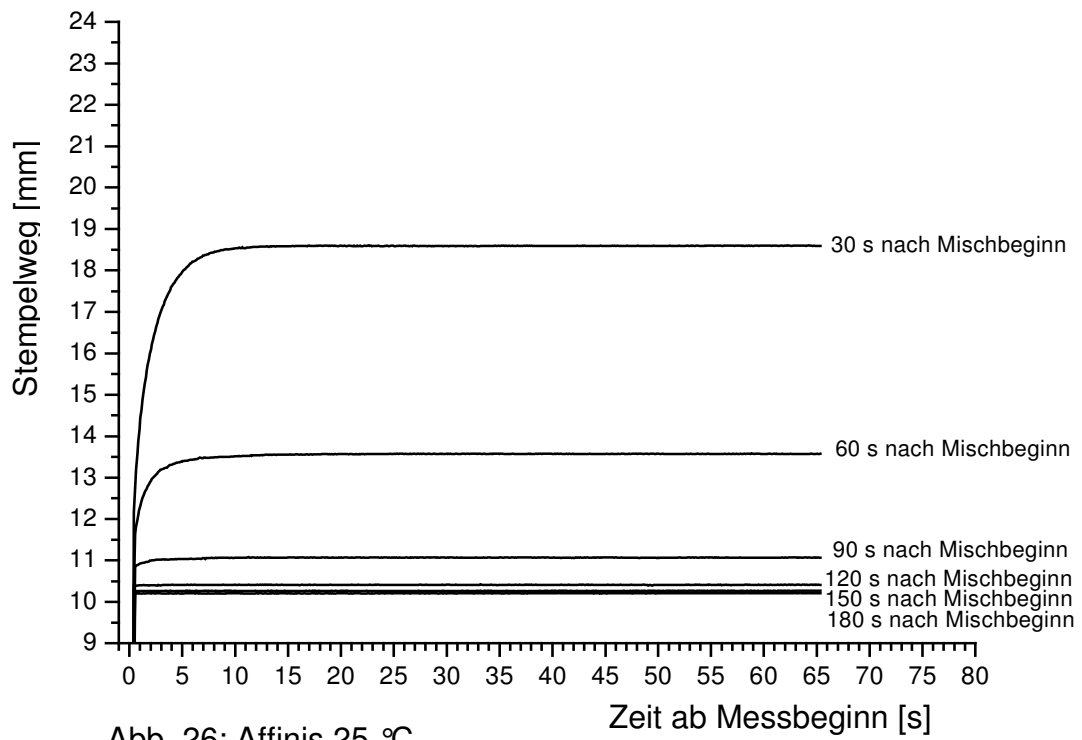
25 °C 13,6 mm,

28 °C 12,6 mm.

Bereits bei einem Messbeginn 90 s nach Mischbeginn liegt der Stempelweg nur noch bei 18 °C über 1 mm.

Eine Gegenüberstellung der Stempelwege bis zum Stempelstillstand bei den 4 Versuchstemperaturen erfolgt im Abschnitt 6.1.2.





6.1.2. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe

Nach der Darstellung der Messergebnisse in Form der Materialkurven in Kapitel 6.1.1. erfolgt nun die Veranschaulichung der gemessenen Werte in Form eines Diagramms, daß die per Laser ermittelten Stempelwege und die manuell gemessenen Flossenhöhen (Abb. 28) gegenüberstellt.

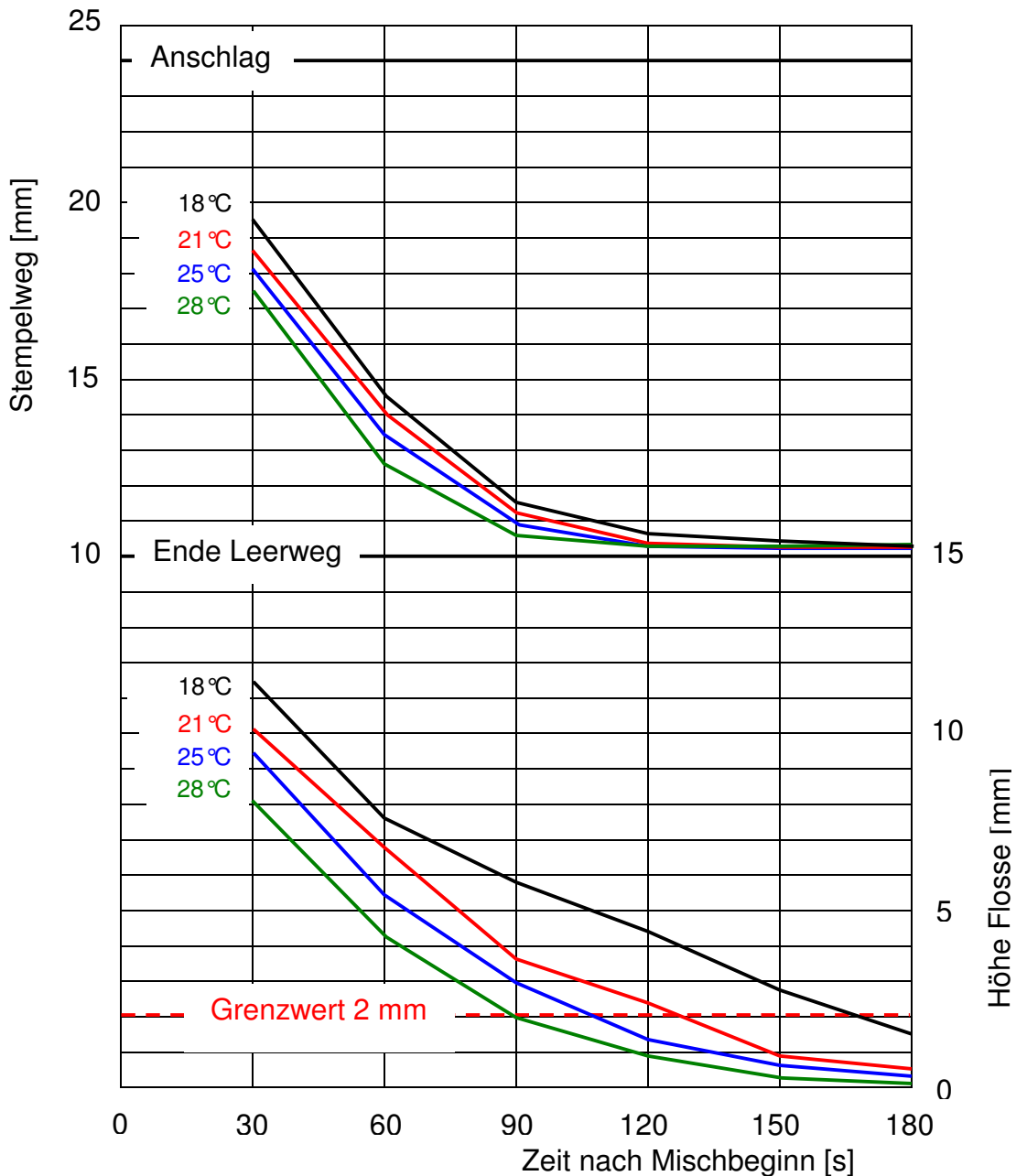


Abb. 28: Affinis Light Body, Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn bei den 4 Materialtemperaturen

Sowohl beim Stempelweg als auch bei der Flossenhöhe ist ein deutlicher Einfluss der Temperatur des Versuchsmaterials zu erkennen. Höhere Materialtemperatur führt zu kürzeren Stempelwegen bis zum Stempelstillstand und geringeren Flossenhöhen.

Beim Weg bis zum Stempelstillstand (Abb. 28, oberer Teil des Diagramms) ist ein deutlicher Abfall bis ca. 90 s nach Mischbeginn zu erkennen, anschließend eine asymptotische Annäherung an den Nullwert.

Die Relationen der Stempelwege zueinander (bei verschiedenen Materialtemperaturen) entsprechen den Relationen der Flossenhöhen zueinander. Allerdings mit unterschiedlich hohen Mittelwerten in mm und mit unterschiedlichem Verlauf in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn, wie bereits im Abschnitt 5.3.2. ausgeführt.

Die in Abschnitt 5.3.1. eingeführten Grenzwerte für eine Mindestflossenhöhe (Abb. 21, unterer Teil des Diagramms) von 2 bzw. 1mm werden in Abhängigkeit von der Materialtemperatur wie folgt unterschritten (Tab. 3):

Tab. 3: Grenzwerttabelle Affinis

Temperatur	Grenzwert 2 mm	Grenzwert 1 mm
18 °C	ca. 165 s nach Mischbeginn	> 180 s nach Mischbeginn
21 °C	ca. 130 s nach Mischbeginn	ca. 145 s nach Mischbeginn
25 °C	ca. 110 s nach Mischbeginn	ca. 135 s nach Mischbeginn
28 °C	ca. 90 s nach Mischbeginn	ca. 115 s nach Mischbeginn

6.1.3. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe

Wie bereits in Abschnitt 5.3.2. ausgeführt, lässt sich ein Zusammenhang zwischen Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe nur indirekt mit Hilfe der Höhe der Masse im Ringspalt zwischen Rohr und Stempel herstellen.

Bekanntlich ist die Flossenhöhe abhängig von der Materialtemperatur des Versuchsmaterials und entspricht dem Strömungsverhalten in den bzw. im Haifischflossenspalt (Abb. 29):

- Bei großem Stempelweg (noch gut fließfähiges Material kurz nach Misch-

beginn) ist die Flossenhöhe kleiner als die berechnete Höhe der Masse im Ringspalt.

- Bei kleinem Stempelweg ist die Flossenhöhe größer als die berechnete Höhe der Masse im Ringspalt.

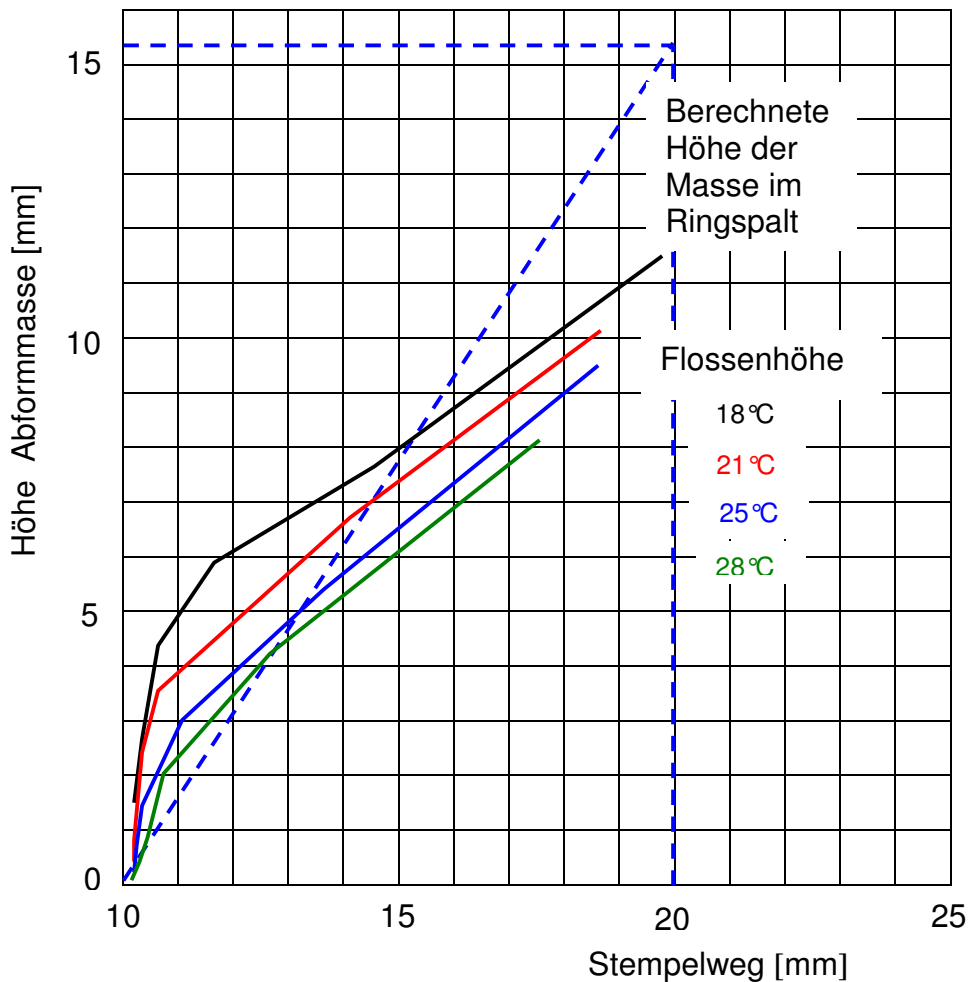


Abb. 29: Affinis Light Body, Höhe der Masse im Ringspalt und Flossenhöhe in Abhängigkeit vom Weg bis Stempelstillstand bei den 4 Materialtemperaturen

6.1.4. Zeit bis Stempelstillstand

Ebenso wie beim Stempelweg ist auch bei den Zeiten bis zum Stempelstillstand (Abb. 30) ein deutlicher Einfluss der Temperatur des Versuchsmaterials zu erkennen. Höhere Materialtemperatur führt zu kürzeren Zeiten bis zum Stempelstillstand.

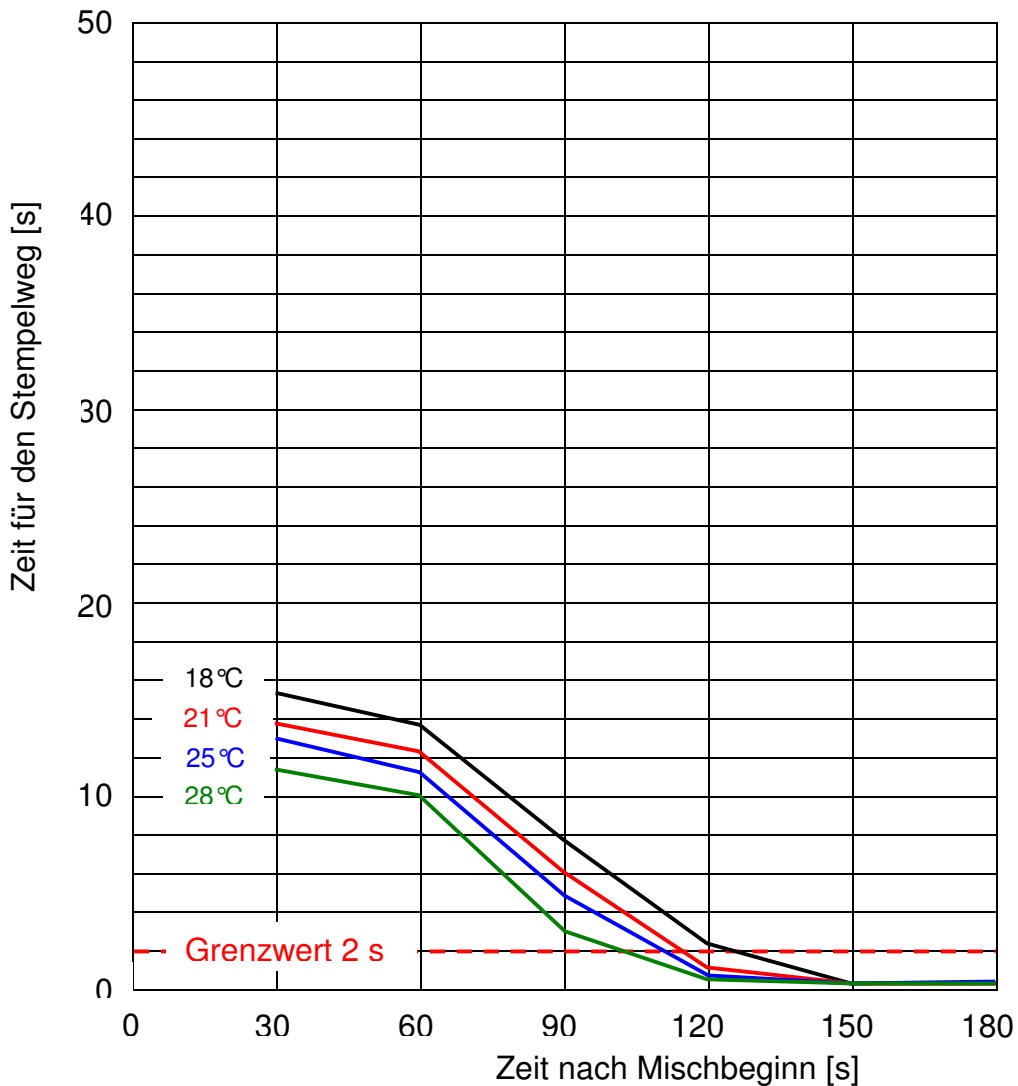


Abb. 30: Affinis Light Body, Zeit bis Stempelstillstand in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn bei den 4 Materialtemperaturen

Die Materialkurven haben im Bereich zwischen 30 und 60 s nach Mischbeginn einen flach abfallenden Verlauf, zwischen 60 und 120 s einen steilen Abfall (ausgenommen 28 °C-Kurve zwischen 90 und 120 s) und über 120 s eine

asymptotische Annäherung an den Nullbereich.

Der im Abschnitt 5.3.2. eingeführte Grenzwert für eine Mindestzeit für den Stempelweg von 2 s wird, in Abhängigkeit von der Materialtemperatur, wie folgt unterschritten:

- Bei 18 °C ca. 125 s,
- bei 21 °C ca. 115 s,
- bei 25 °C ca. 110 s
- bei 28 °C ca. 103 s nach Mischbeginn.

6.2. Aquasil Ultra LV

6.2.1. Stempelweg über Zeit ab Messbeginn

Dargestellt sind in den Abb. 31-34 zunächst die Messergebnisse in Form der unter Kapitel 5.2. besprochenen Materialkurven als Mittelwerte aus jeweils 5 Messungen.

Wie bereits ausgeführt wurden die Versuche zeitlich gestaffelt zu den **6 verschiedenen Zeiten** 30, 60, 90, 120, 150 und 180 s nach Mischbeginn gestartet.

Die Messungen wurden ausserdem bei den **4 Materialtemperaturen** 18, 21, 25 und 28 °C mit vortemperierter Abformmasse durchgeführt.

Grundsätzlich hat das Material mit zunehmender Temperatur einen kürzeren Stempelweg bis zum Stempelstillstand,

z. B. bei Messbeginn 30 s nach Mischbeginn für 18 °C 15,9 mm,

21 °C 15,3 mm,

25 °C 14,5 mm,

28 °C 13,8 mm,

bei Messbeginn 60 s nach Mischbeginn für 18 °C 12,7 mm,

21 °C 12,0 mm,

25 °C 11,7 mm,

28 °C 11,3 mm.

Bereits bei einem Messbeginn 90 s nach Mischbeginn liegt der Stempelweg nur noch bei 18 °C bei 1 mm.

Eine Gegenüberstellung der Stempelwege bis zum Stempelstillstand bei den 4 Versuchstemperaturen erfolgt im Abschnitt 6.2.2.

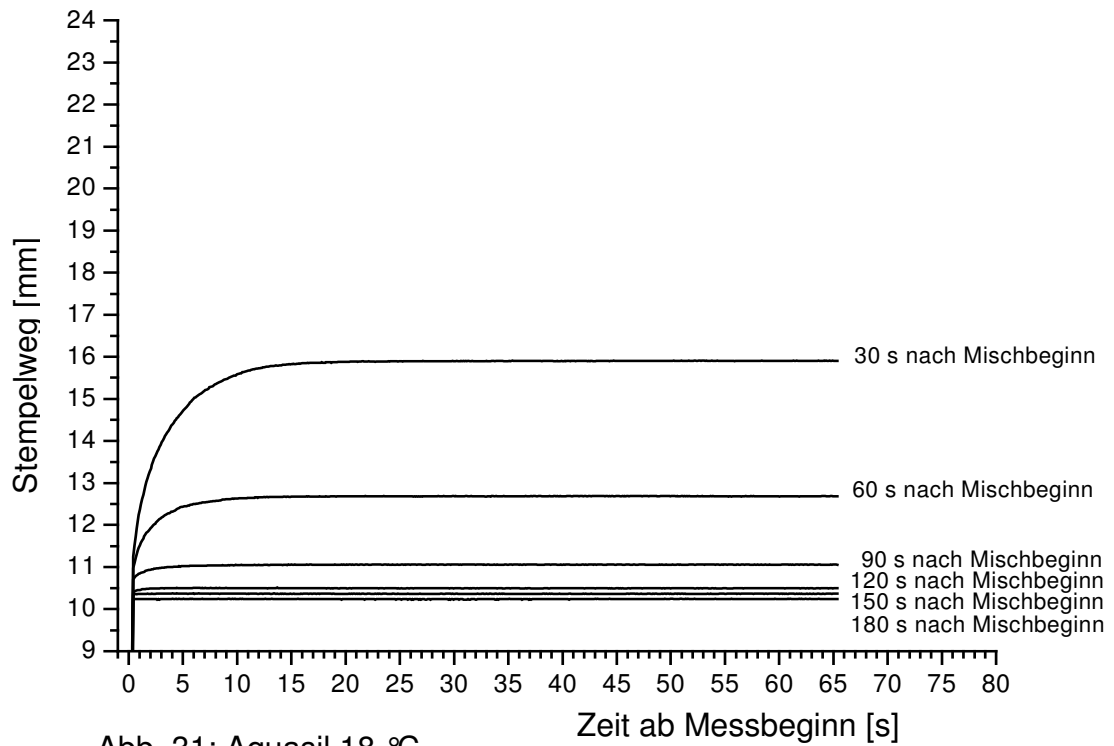


Abb. 31: Aquasil 18 °C

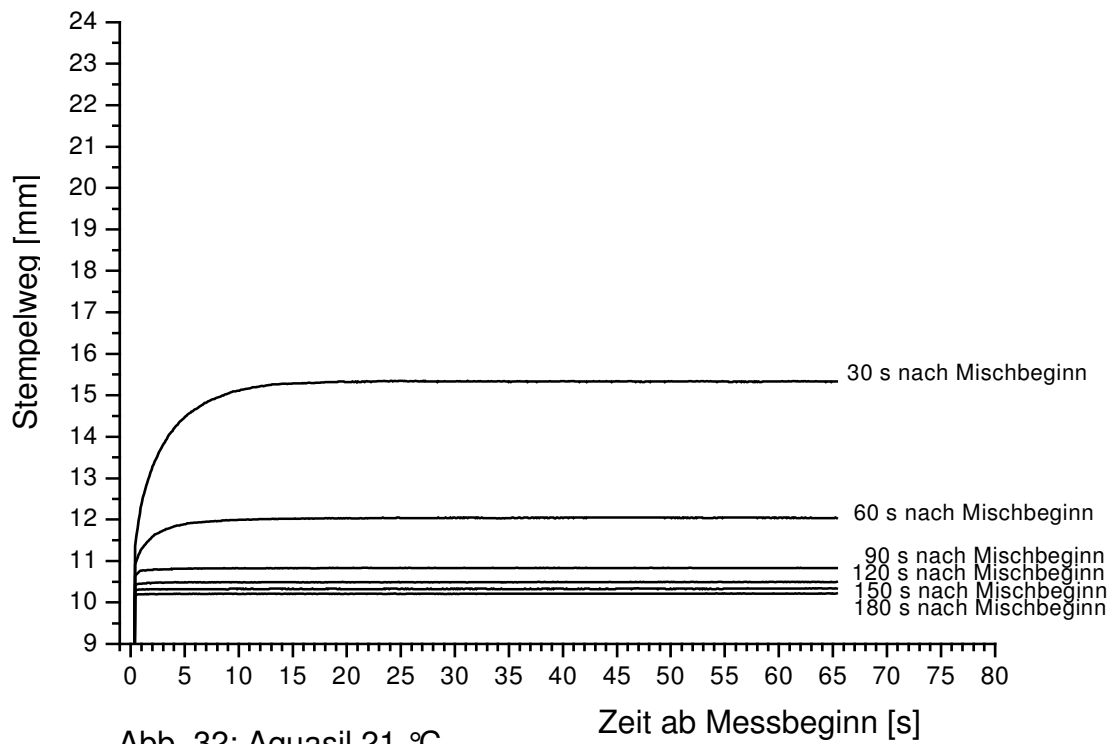


Abb. 32: Aquasil 21 °C

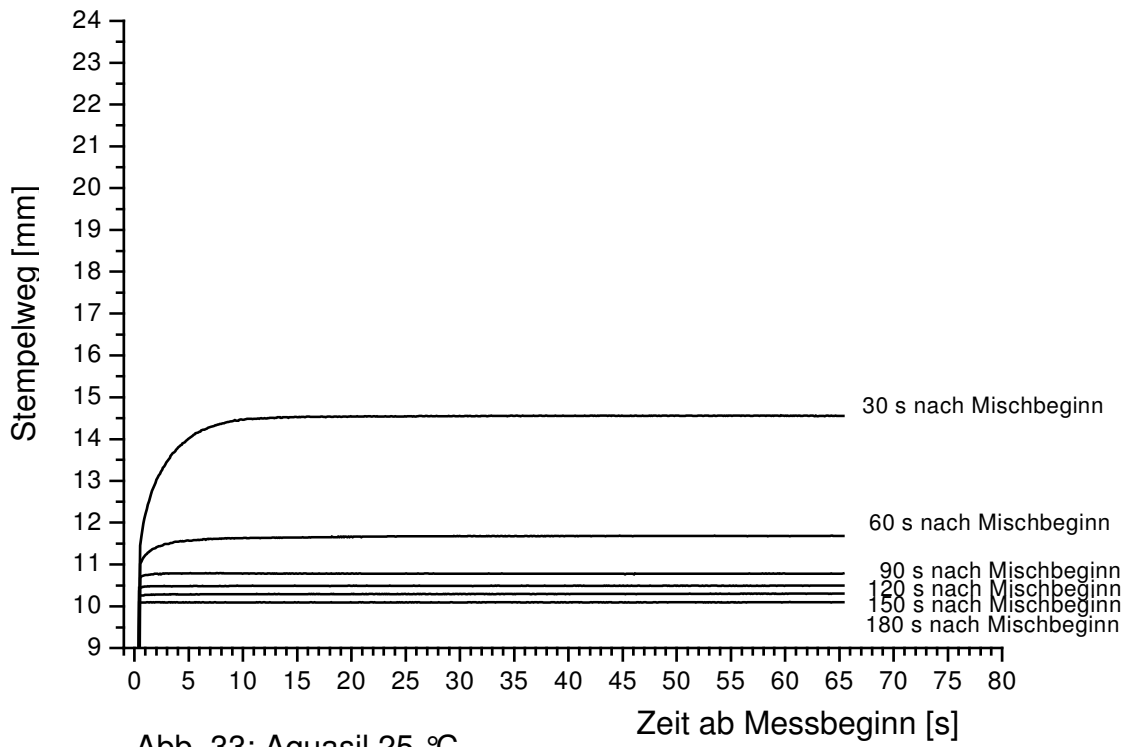


Abb. 33: Aquasil 25 °C

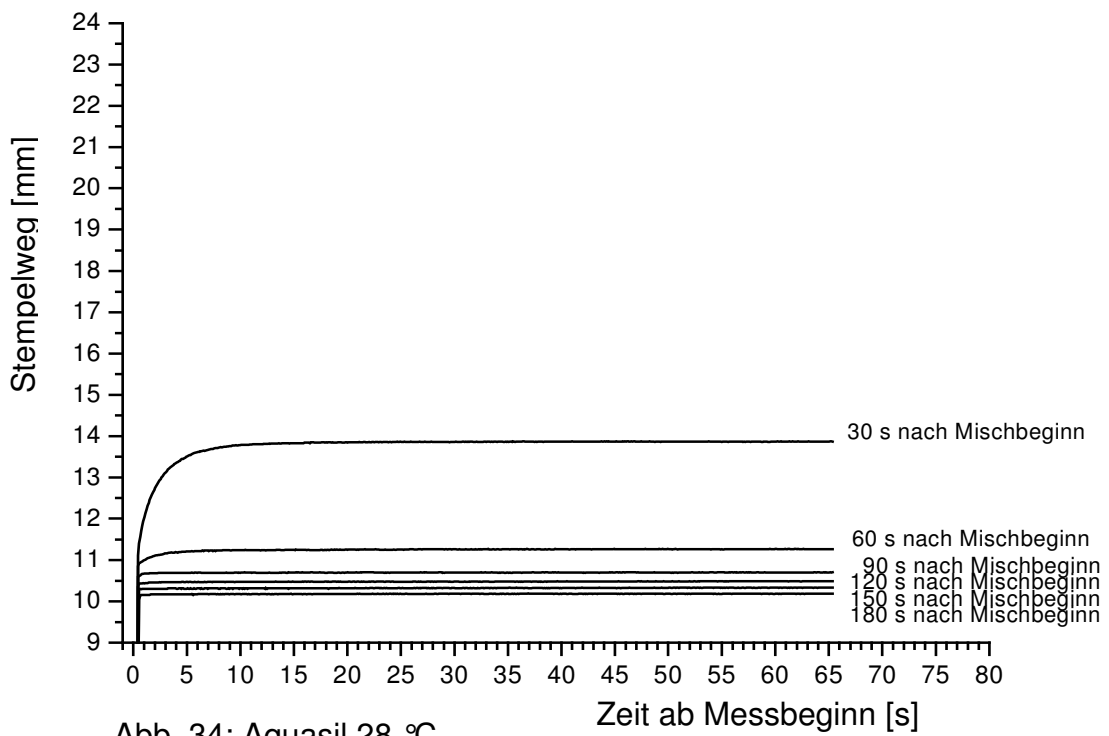


Abb. 34: Aquasil 28 °C

6.2.2. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe

Nach der Darstellung der Messergebnisse in Form der Materialkurven in Kapitel 6.1.1. erfolgt nun die Veranschaulichung der gemessenen Werte in Form eines Diagramms, daß die per Laser ermittelten Stempelwege und die manuell gemessenen Flossenhöhen (Abb. 35) gegenüberstellt.

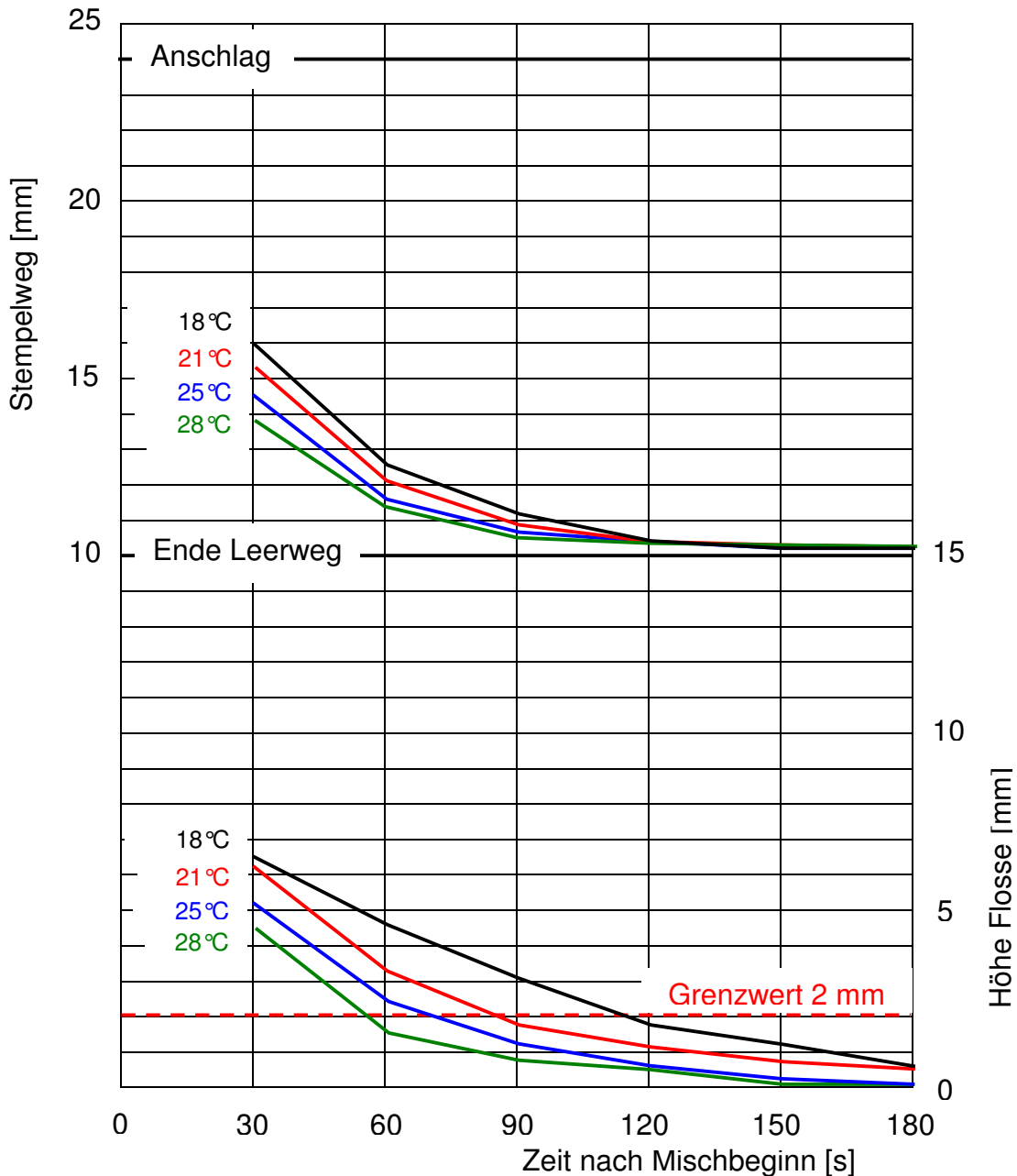


Abb. 35: Aquasil Ultra L V, Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn bei den 4 Versuchstemperaturen

Wie im vorhergehenden Kapitel ist sowohl beim Stempelweg als auch bei der Flossenhöhe ein deutlicher Einfluss der Temperatur des Versuchsmaterials zu erkennen. Höhere Materialtemperatur führt zu kürzeren Stempelwegen bis zum Stempelstillstand und geringeren Flossenhöhen.

Beim Weg bis zum Stempelstillstand (Abb. 35, oberer Teil) ist ein deutlicher Abfall bis ca. 90 s nach Mischbeginn zu erkennen, anschließend eine asymptotische Annäherung an den Nullwert.

Die Relationen der Stempelwege zueinander (bei verschiedenen Materialtemperaturen) entsprechen den Relationen der Flossenhöhen zueinander. Allerdings mit unterschiedlich hohen Mittelwerten in mm und mit unterschiedlichem Verlauf über der Zeit nach Mischbeginn. .

Die in Abschnitt 5.3.1. eingeführten Grenzwerte für eine Mindestflossenhöhe (Abb. 21, unterer Teil des Diagramms) von 2 bzw. 1 mm werden in Abhängigkeit von der Materialtemperatur wie folgt unterschritten (Tab.4):

Tab. 4: Grenzwerttabelle Aquasil

Temperatur	Grenzwert 2 mm	Grenzwert 1 mm
18 °C	ca. 115 s nach Mischbeginn	ca. 160 s nach Mischbeginn
21 °C	ca. 85 s nach Mischbeginn	ca. 130 s nach Mischbeginn
25 °C	ca. 73 s nach Mischbeginn	ca. 100 s nach Mischbeginn
28 °C	ca. 55 s nach Mischbeginn	ca. 80 s nach Mischbeginn

6.2.3. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe

Wie bereits in Abschnitt 5.3.2. ausgeführt, lässt sich ein Zusammenhang zwischen Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe nur indirekt mit Hilfe der Höhe der Masse im Ringspalt zwischen Rohr und Stempel herstellen.

Bekanntlich ist die Flossenhöhe abhängig von der Materialtemperatur des Versuchsmaterials und entspricht dem Strömungsverhalten in den bzw. im Haifischflossenspalt (Abb. 36):

- Bei großem Stempelweg (noch gut fließfähiges Material kurz nach Mischbeginn) ist die Flossenhöhe kleiner als die berechnete Höhe der Masse im Ringspalt.

- Bei kleinem Stempelweg nähert sich die Flossenhöhe der berechneten Höhe der Masse im Ringspalt an.

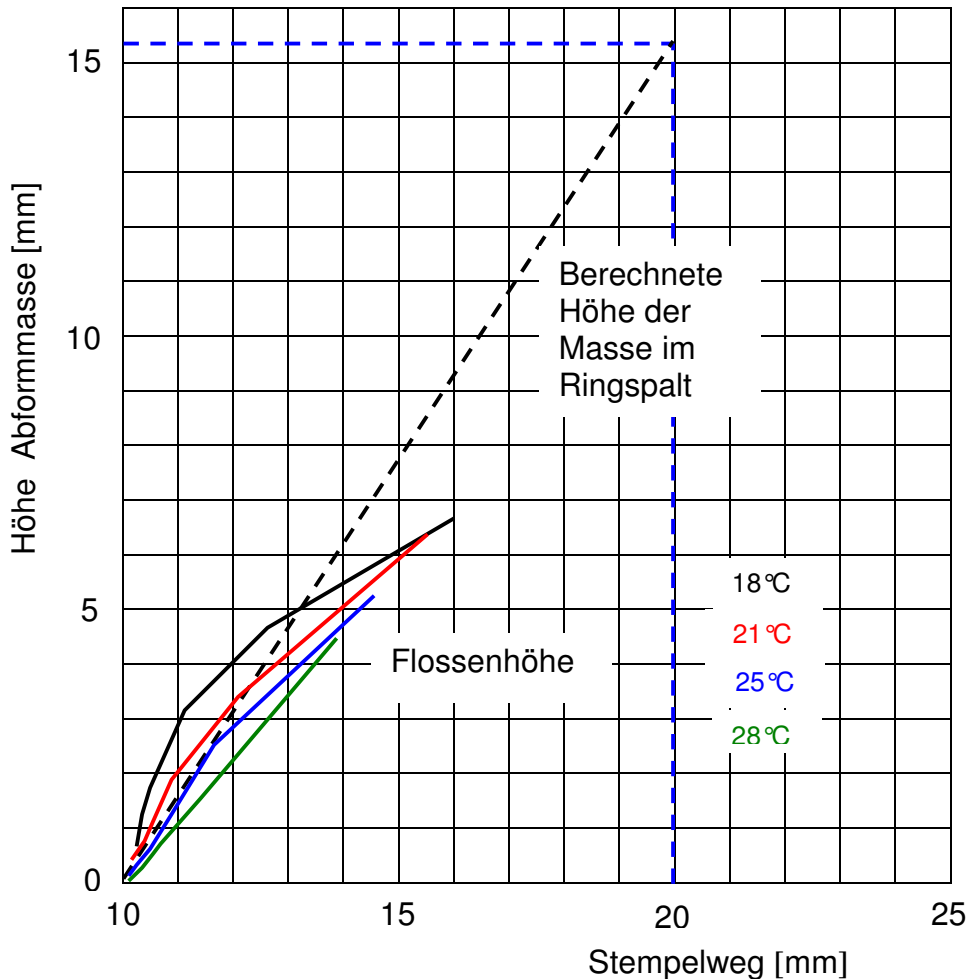


Abb. 36: Aquasil Ultra LV, Höhe der Masse im Ringspalt und Flossenhöhe in Abhängigkeit vom Weg bis Stempelstillstand bei den 4 Materialtemperaturen

6.2.4. Zeit bis Stempelstillstand

Ebenso wie beim Stempelweg ist auch bei den Zeiten bis zum Stempelstillstand (Abb. 37) ein deutlicher Einfluss der Temperatur des Versuchsmaterials zu erkennen. Höhere Materialtemperatur führt zu kürzeren Zeiten bis zum Stempelstillstand.

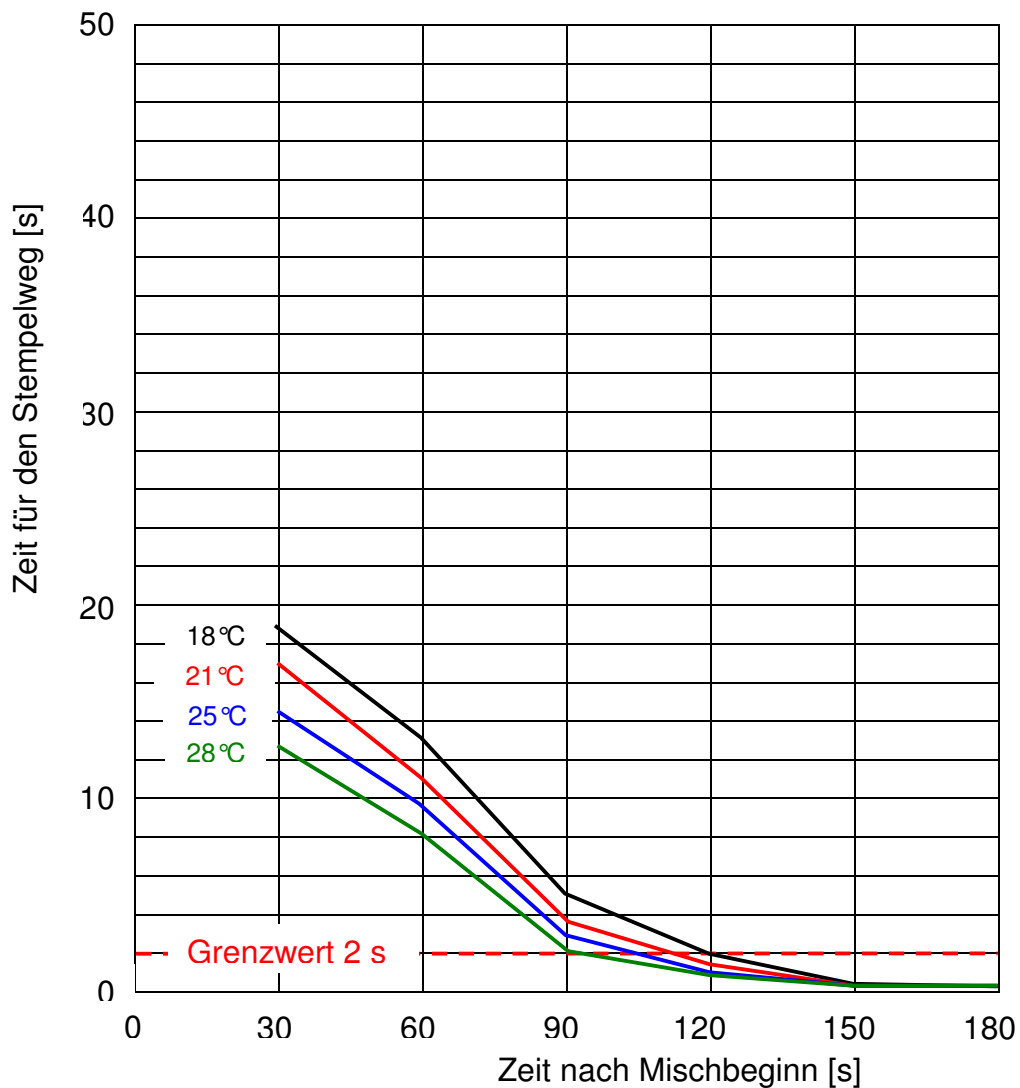


Abb. 37: Aquasil Ultra LV, Zeit bis Stempelstillstand in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn bei den 4 Materialtemperaturen

Die Materialkurven haben im Bereich zwischen 30 und 90 s nach Mischbeginn einen steilen Abfall, zwischen 90 und 120 s einen flacheren Verlauf und über 120 s eine asymptotische Annäherung an den Nullbereich.

Der im Abschnitt 5.3.2. eingeführte Grenzwert für eine Mindestzeit für den Stempelweg von 2 s wird, in Abhängigkeit von der Materialtemperatur, wie folgt unterschritten:

- Bei 18 °C ca. 120 s, bei 21 °C ca. 110 s, bei 25 °C ca. 105 s und bei 28 °C ca. 95 s nach Mischbeginn.

6.3. Flexitime Correct Flow

6.3.1. Stempelweg über Zeit ab Messbeginn

Dargestellt sind in den Abb. 38-41 zunächst die Messergebnisse in Form der unter Kapitel 5.2. besprochenen Materialkurven als Mittelwerte aus jeweils 5 Messungen.

Wie bereits ausgeführt wurden die Versuche zeitlich gestaffelt zu den **6 verschiedenen Zeiten** 30, 60, 90, 120, 150 und 180 s nach Mischbeginn gestartet.

Die Messungen wurden ausserdem bei den **4 Materialtemperaturen** 18, 21, 25 und 28 °C mit vortemperierter Abformmasse durchgeführt.

Grundsätzlich hat das Material mit zunehmender Temperatur einen kürzeren Stempelweg bis zum Stempelstillstand,

z. B. bei Messbeginn 30 s nach Mischbeginn für 18 °C 17,4 mm,

21 °C 17,2 mm,

25 °C 16,4 mm,

28 °C 16,0 mm,

bei Messbeginn 60 s nach Mischbeginn für 18 °C 15,0 mm,

21 °C 14,4 mm,

25 °C 13,4 mm,

28 °C 12,8 mm.

Bereits bei einem Messbeginn 90 s nach Mischbeginn liegt der Stempelweg nur noch bei 18 und 21 °C über 1 mm.

Eine Gegenüberstellung der Stempelwege bis zum Stempelstillstand bei den 4 Versuchstemperaturen erfolgt im Abschnitt 6.3.2.

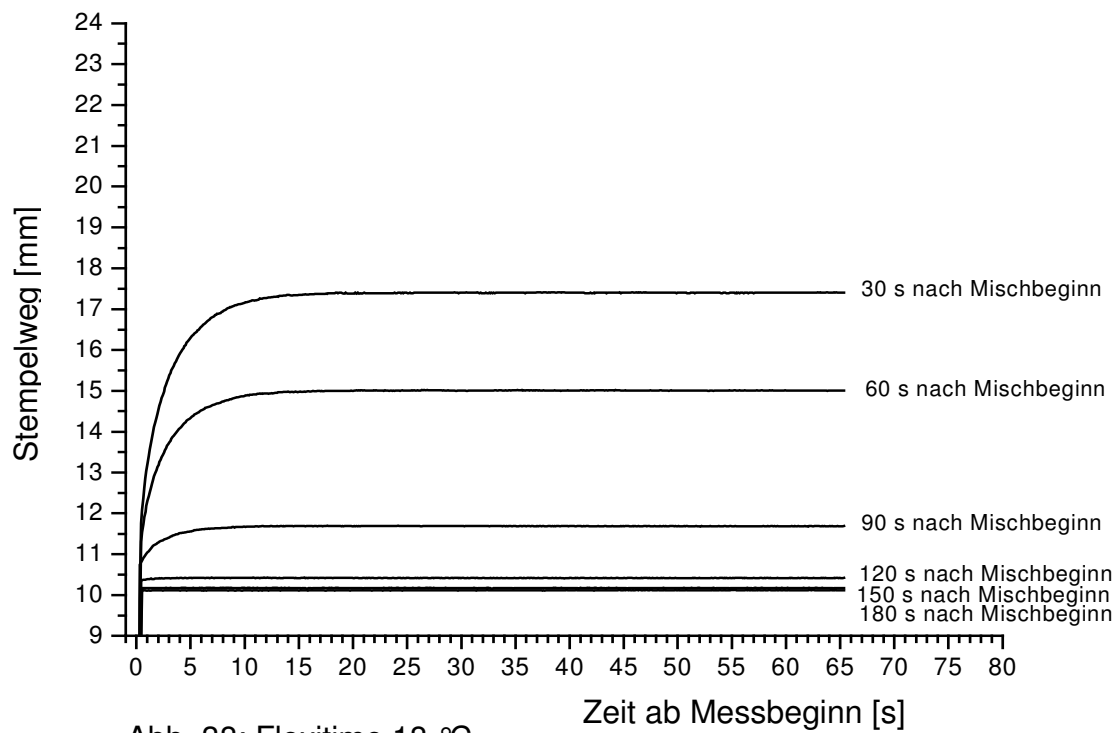


Abb. 38: Flexitime 18 °C

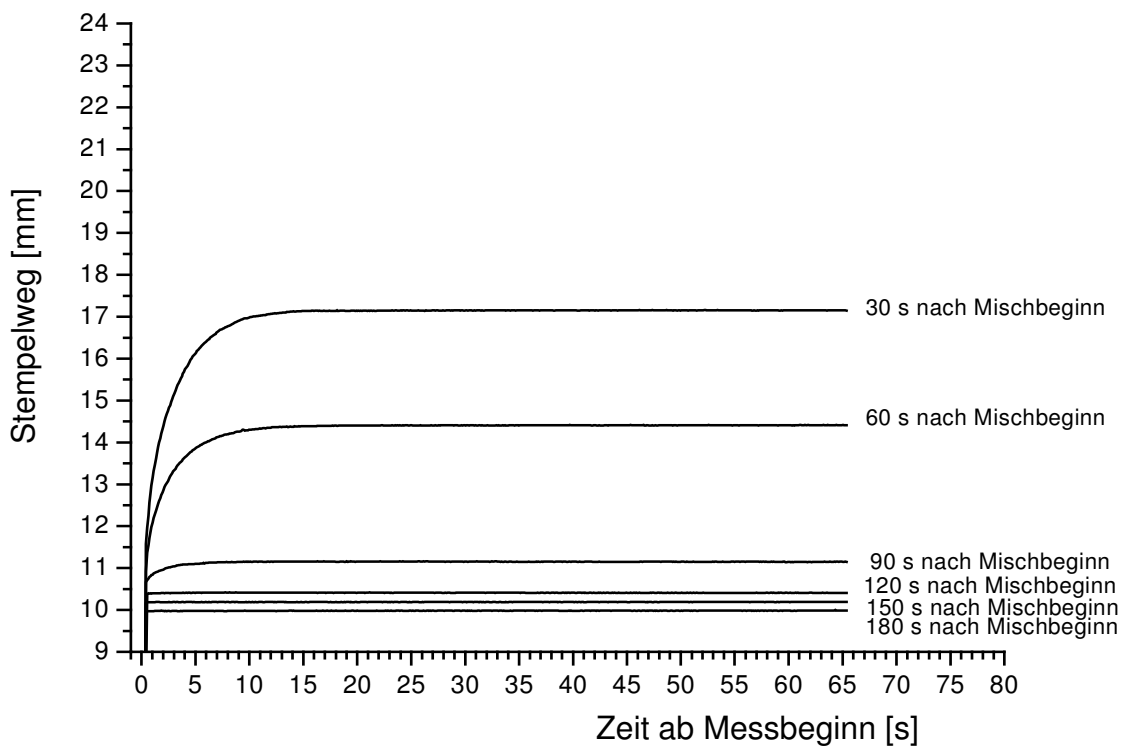
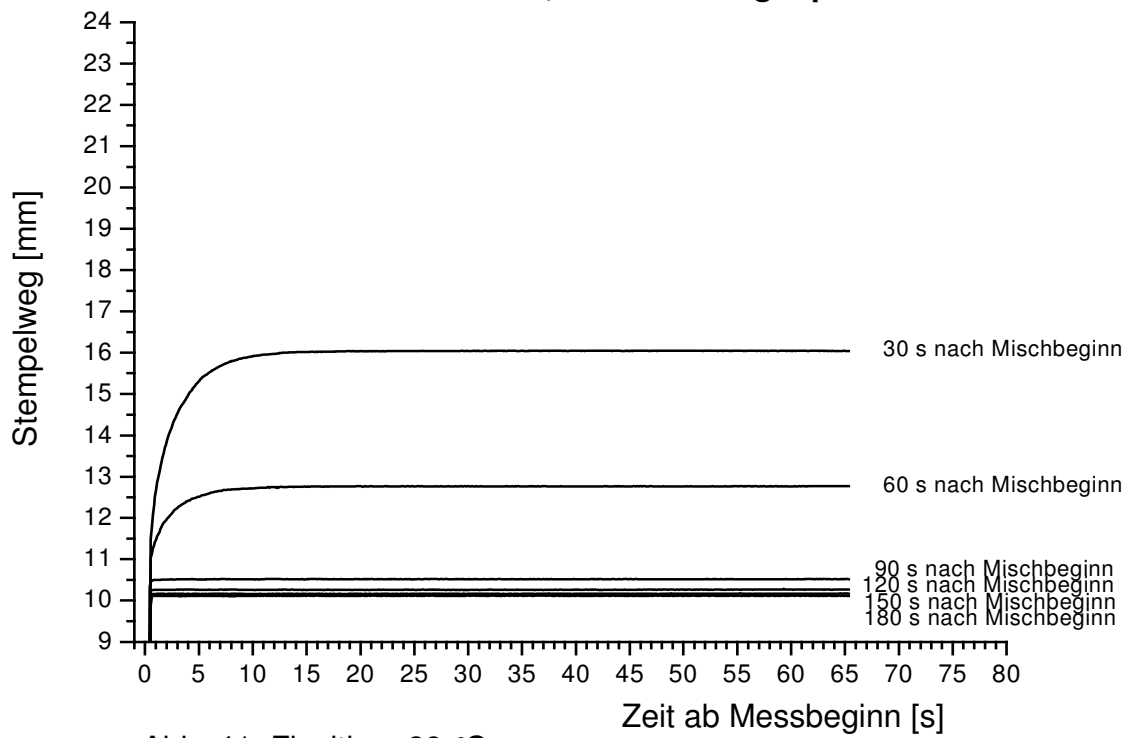
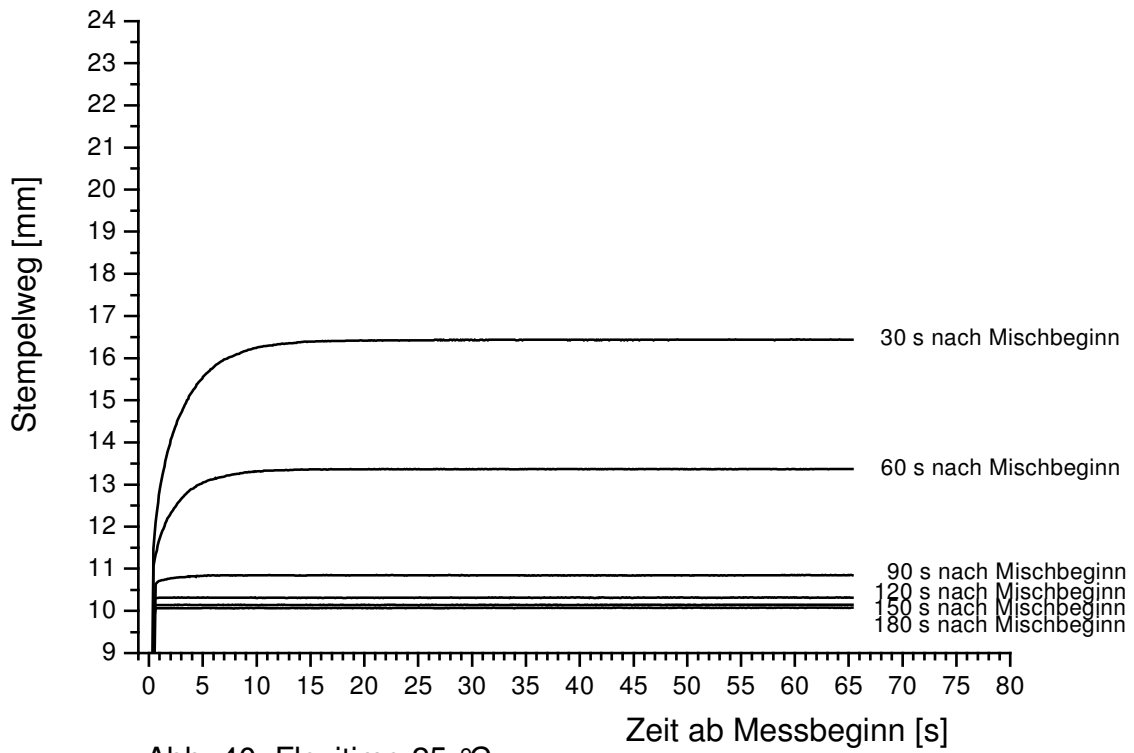


Abb. 39: Flexitime 21 °C



6.3.2. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe

Nach der Darstellung der Messergebnisse in Form der Materialkurven in Kapitel 6.1.1. erfolgt nun die Veranschaulichung der gemessenen Werte in Form eines Diagramms, dass die per Laser ermittelten Stempelwege und die manuell gemessenen Flossenhöhen (Abb. 42) gegenüberstellt.

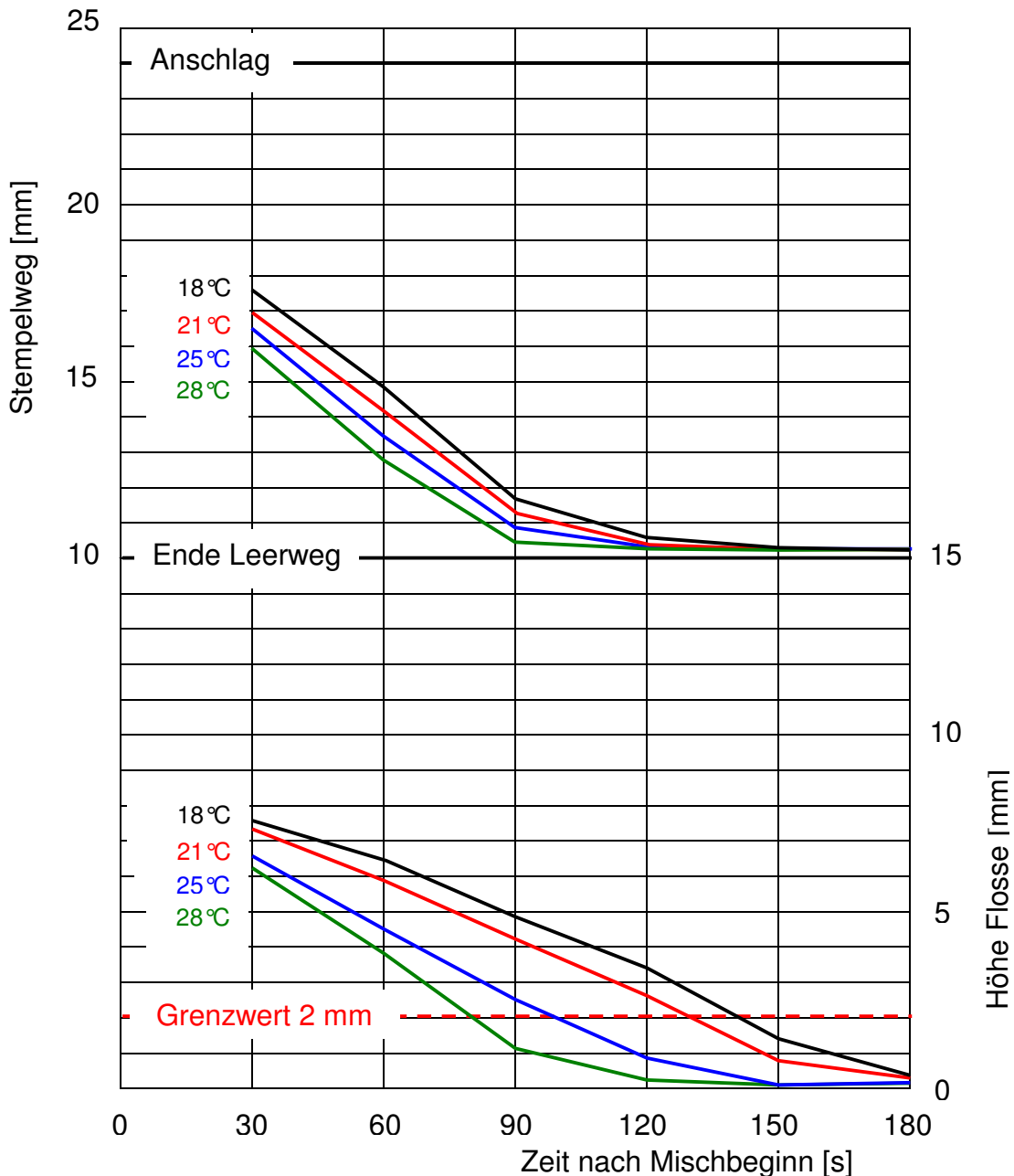


Abb. 42: Flexitime Correct Flow, Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn bei den 4 Materialtemperaturen

Wie im vorhergehenden Kapitel ist sowohl beim Stempelweg als auch bei der Flossenhöhe ein deutlicher Einfluss der Temperatur des Versuchsmaterials zu erkennen. Höhere Materialtemperatur führt zu kürzeren Stempelwegen bis zum Stempelstillstand und geringeren Flossenhöhen.

Beim Weg bis zum Stempelstillstand (Abb. 42, oberer Teil) ist ein deutlicher Abfall bis ca. 90 s nach Mischbeginn zu erkennen, anschließend eine asymptotische Annäherung an den Nullwert.

Die Relationen der Stempelwege zueinander (bei verschiedenen Materialtemperaturen) entsprechen den Relationen der Flossenhöhen zueinander. Allerdings mit unterschiedlich hohen Mittelwerten in mm und mit unterschiedlichem Verlauf in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn, wie bereits im Abschnitt 5.3.2. ausgeführt.

Die in Abschnitt 5.3.1. eingeführten Grenzwerte für eine Mindestflossenhöhe (Abb. 21, unterer Teil des Diagramms) von 2 bzw. 1 mm werden in Abhängigkeit von der Materialtemperatur wie folgt unterschritten (Tab. 5):

Tab. 5: Grenzwerttabelle Flexitime

Temperatur	Grenzwert 2 mm	Grenzwert 1 mm
18 °C	ca. 140 s nach Mischbeginn	ca. 165 s nach Mischbeginn
21 °C	ca. 130 s nach Mischbeginn	ca. 145 s nach Mischbeginn
25 °C	ca. 100 s nach Mischbeginn	ca. 115 s nach Mischbeginn
28 °C	ca. 80 s nach Mischbeginn	ca. 95 s nach Mischbeginn

6.3.3. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe

Wie bereits in Abschnitt 5.3.2. ausgeführt, lässt sich ein Zusammenhang zwischen Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe nur indirekt mit Hilfe der Höhe der Masse im Ringspalt zwischen Rohr und Stempel herstellen.

Bekanntlich ist die Flossenhöhe abhängig von der Materialtemperatur des Versuchsmaterials und entspricht dem Strömungsverhalten in den bzw. im Haifischflossenspalt (Abb. 43):

- Bei großem Stempelweg (noch gut fließfähiges Material kurz nach

Mischbeginn) ist die Flossenhöhe kleiner als die berechnete Höhe der Masse im Ringspalt.

- Bei kleinem Stempelweg ist die Flossenhöhe größer als die berechnete Höhe der Masse im Ringspalt.

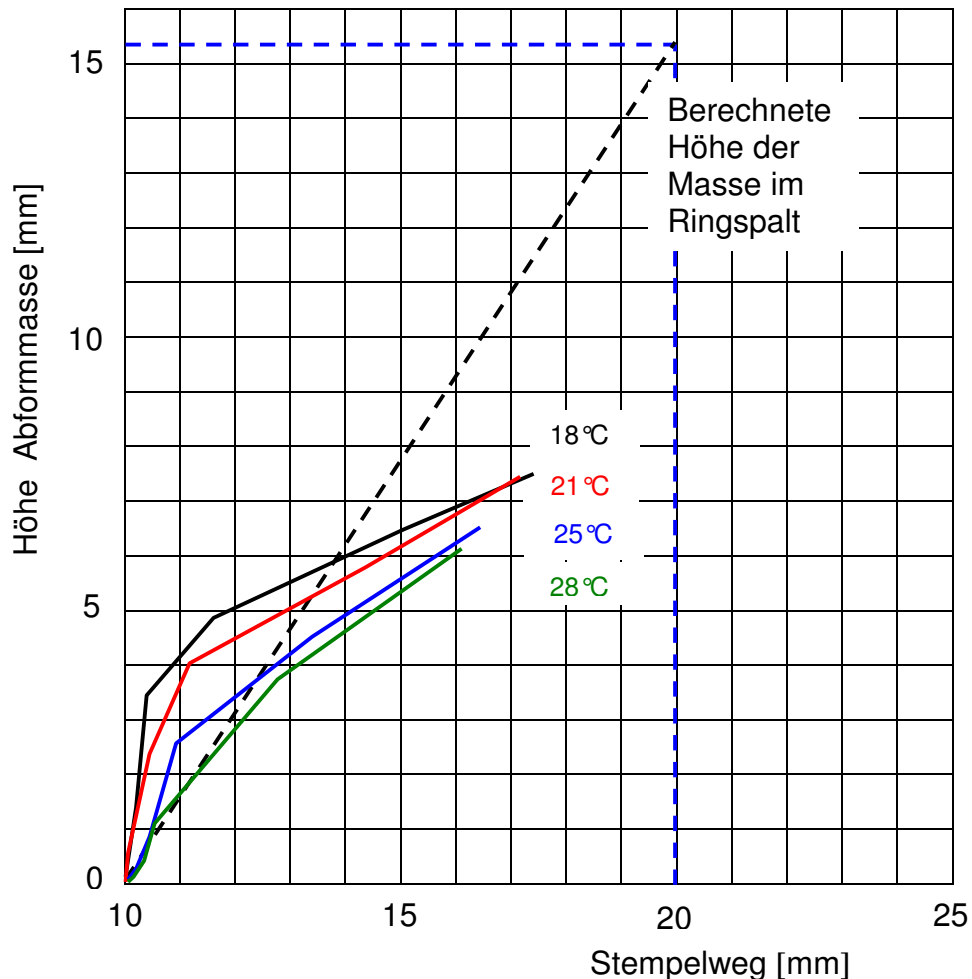


Abb. 43: Flexitime Correct Flow, Höhe der Masse im Ringspalt und Flossenhöhe in Abhängigkeit vom Weg bis Stempelstillstand bei den 4 Materialtemperaturen

6.3.4. Zeit bis Stempelstillstand

Ebenso wie beim Stempelweg ist auch bei den Zeiten bis zum Stempelstillstand (Abb. 44) ein deutlicher Einfluss der Temperatur des Versuchsmaterials zu erkennen. Höhere Materialtemperatur führt zu kürzeren Zeiten bis zum Stempelstillstand.

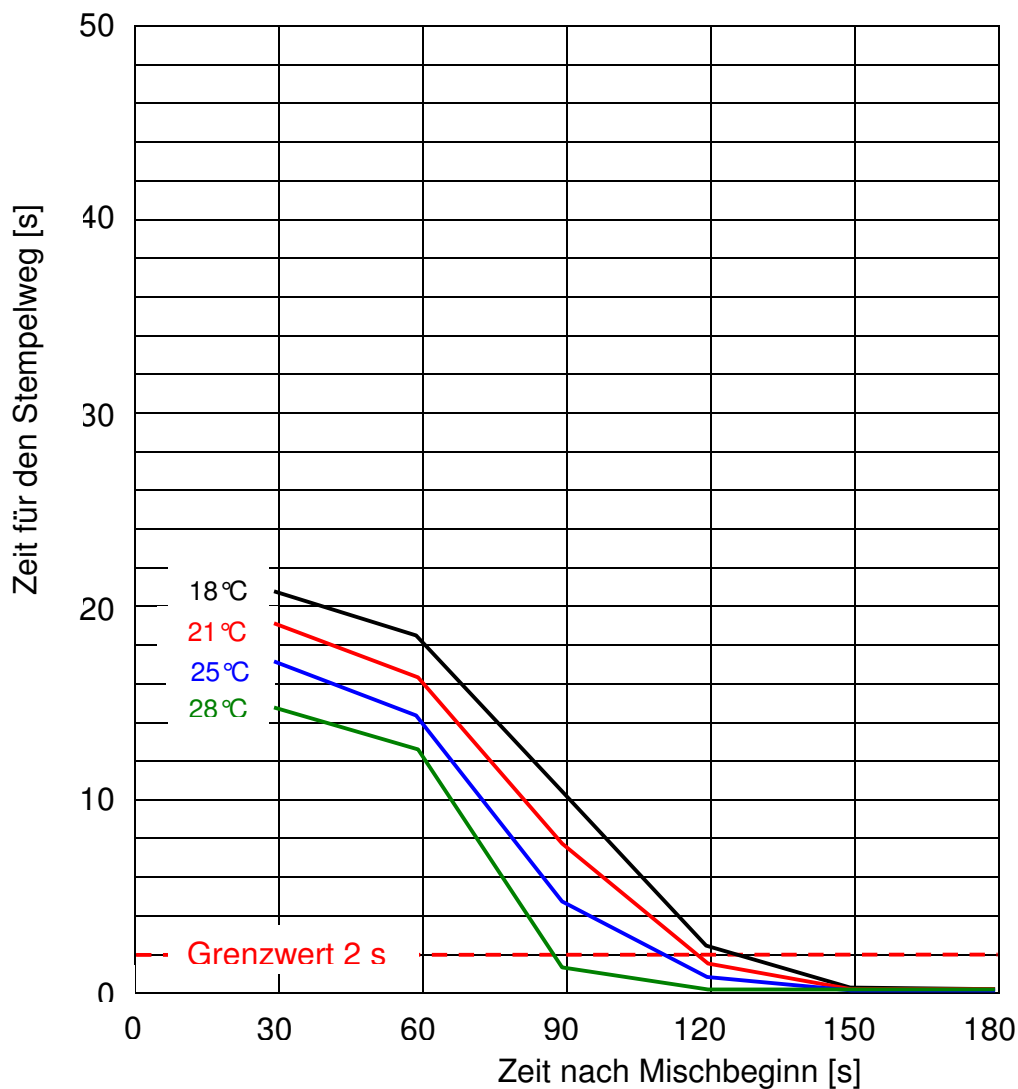


Abb. 44: Flexitime Correct Flow, Zeit bis Stempelstillstand in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn bei den 4 Materialtemperaturen

Die Materialkurven haben im Bereich zwischen 30 und 60 s nach Mischbeginn einen flach fallenden Verlauf, zwischen 60 und 120 s einen steilen Abfall (ausgenommen 28 °C-Kurve zwischen 90 und 120 s) und über 120 s eine asymptotische Annäherung an den Nullbereich.

Der im Abschnitt 5.3.2. eingeführte Grenzwert für eine Mindestzeit für den Stempelweg von 2 s wird, in Abhängigkeit von der Materialtemperatur, wie folgt unterschritten:

- Bei 18 °C ca. 130 s, bei 21 °C ca. 120 s, bei 25 °C ca. 110 s und bei 28 °C ca. 85 s nach Mischbeginn.

6.4. Impregum Garant L Duo Soft

6.4.1. Stempelweg über Zeit ab Messbeginn

Dargestellt sind in den Abb. 45-48 zunächst die Messergebnisse in Form der unter Kapitel 5.2. besprochenen Materialkurven als Mittelwerte aus jeweils 5 Messungen.

Wie bereits ausgeführt wurden die Versuche zeitlich gestaffelt zu den **6 verschiedenen Zeiten** 30, 60, 90, 120, 150 und 180 s nach Mischbeginn gestartet.

Die Messungen wurden außerdem bei den **4 Materialtemperaturen** 18, 21, 25 und 28 °C mit vortemperierter Abformmasse durchgeführt.

Grundsätzlich hat das Material mit zunehmender Temperatur ebenfalls einen kürzeren Stempelweg bis zum Stempelstillstand. Auf Grund der guten Fließfähigkeit geht der Stempel bei Messbeginn 30 s nach Mischbeginn jedoch bei allen 4 Temperaturen auf Anschlag, die wirklichen Stempelwege sind deshalb mit dieser Vorrichtung nicht bestimmbar.

Also bei Messbeginn 30 s nach Mischbeginn für 18 °C 23,8 mm,

21 °C 23,8 mm,

25 °C 23,8 mm,

28 °C 23,8 mm,

bei Messbeginn 60 s nach Mischbeginn für 18 °C 23,6 mm,

21 °C 23,6 mm,

25 °C 23,5 mm,

28 °C 23,5 mm.

Auch bei einem Messbeginn 90 s nach Mischbeginn liegt der Stempelweg bei 18 °C noch über 22 mm, bei 28 °C noch über 17 mm.

Impregum ist also ein Abformmaterial mit hoher Fließfähigkeit.

Eine Gegenüberstellung der Stempelwege bis zum Stempelstillstand bei den 4 Versuchstemperaturen erfolgt im Abschnitt 6.4.2.

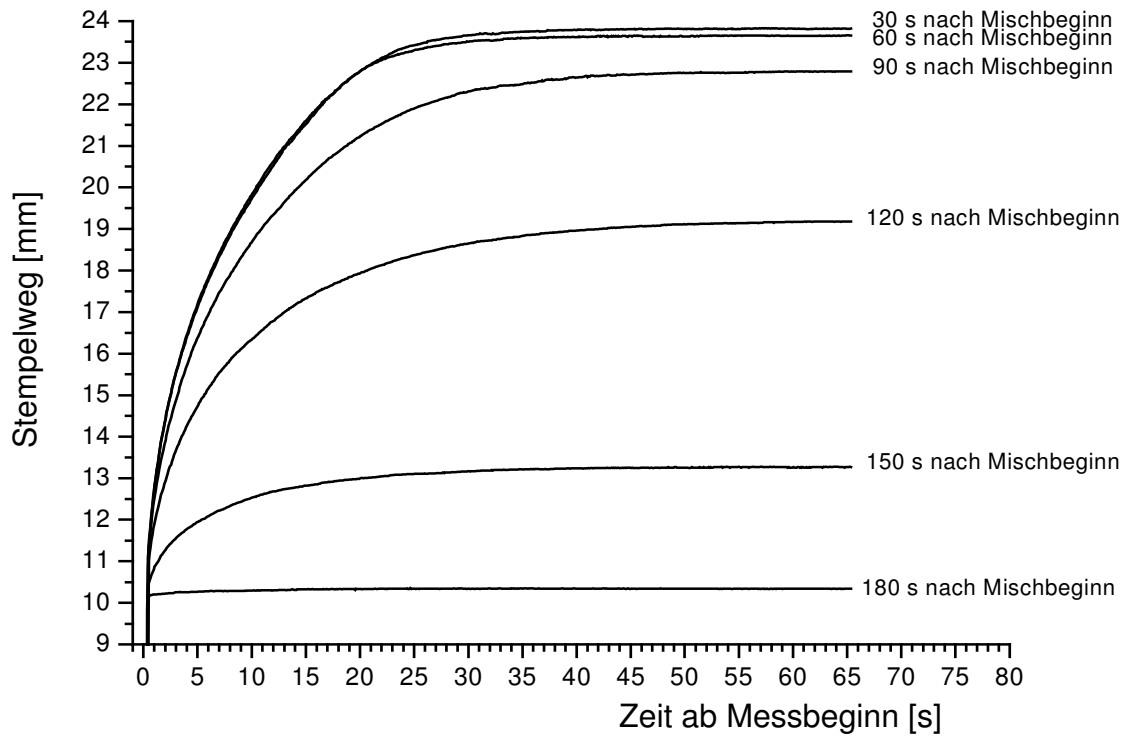


Abb. 45: Impregum 18 °C

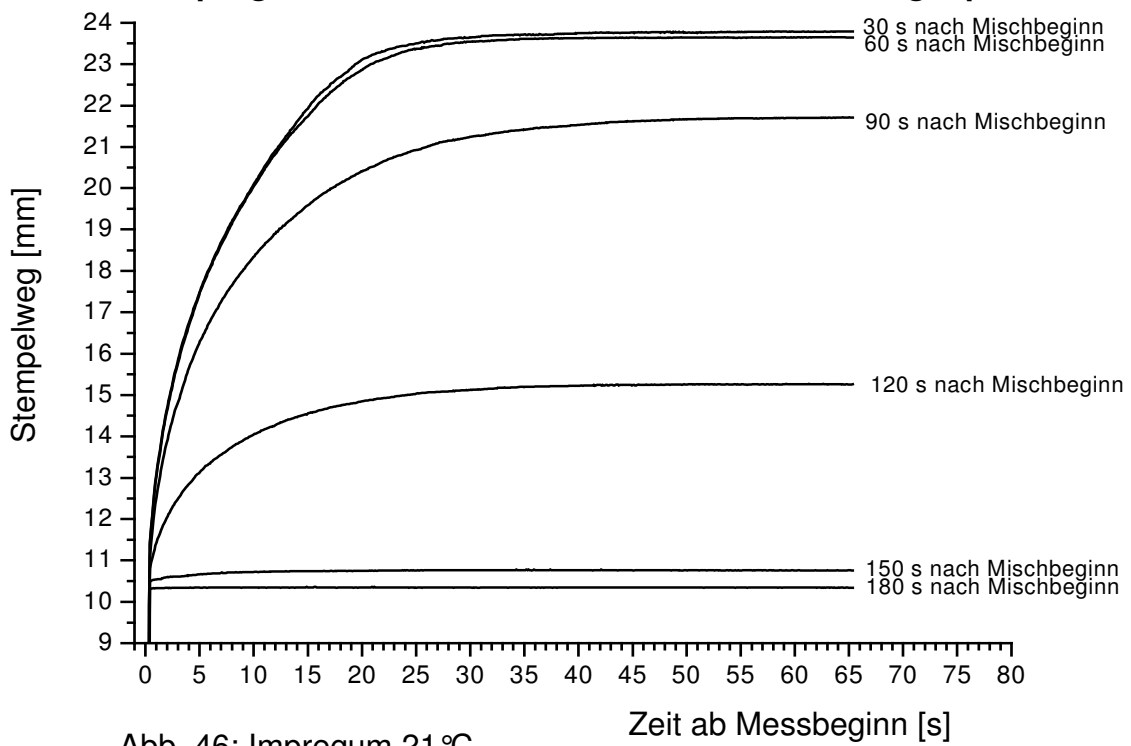


Abb. 46: Impregum 21 °C

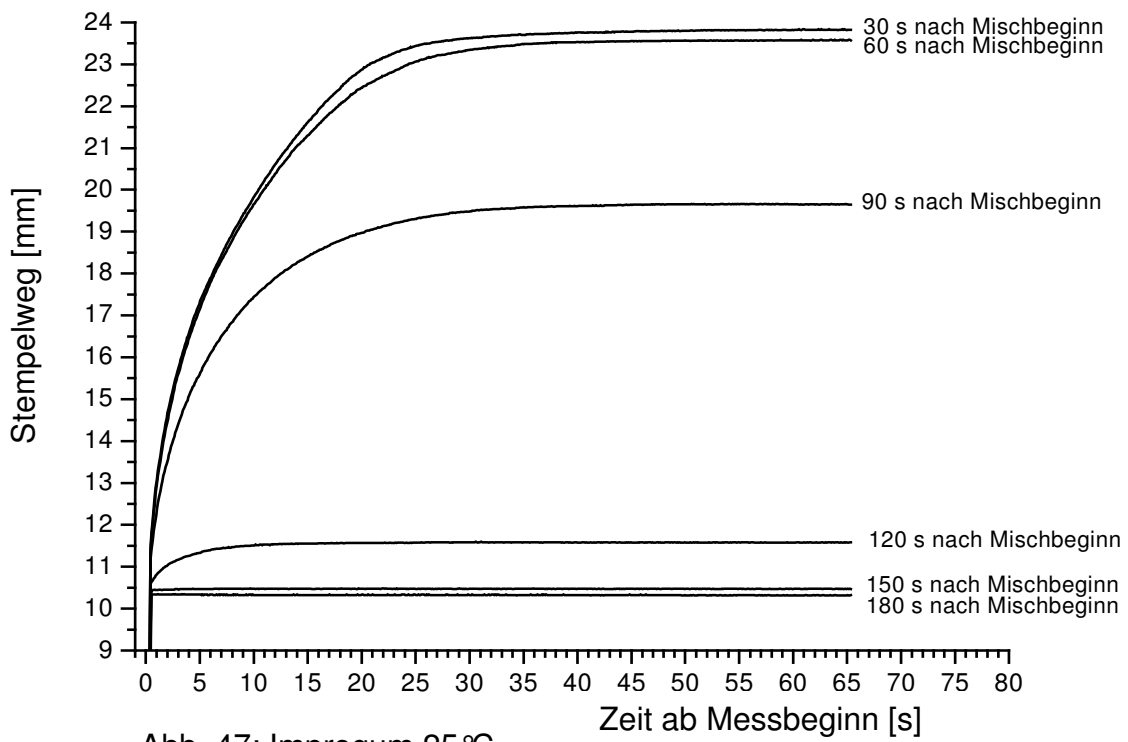


Abb. 47: Impregum 25°C

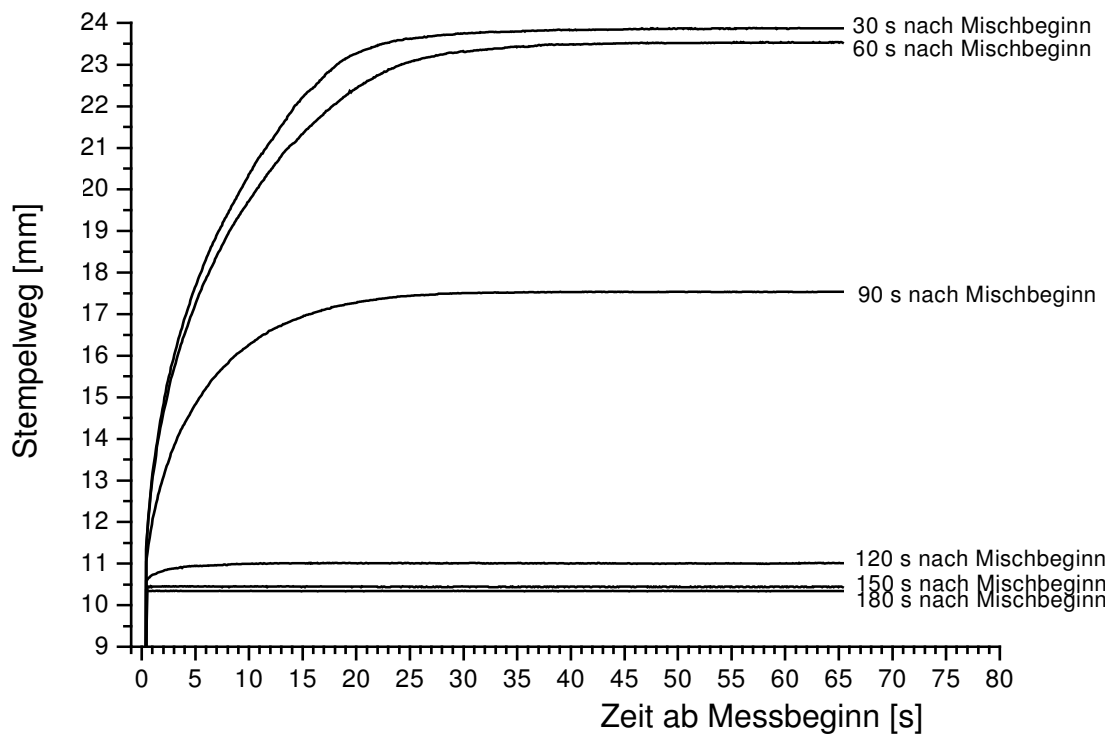


Abb. 48: Impregum 28°C

6.4.2. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe

Nach der Darstellung der Messergebnisse in Form der Materialkurven in Kapitel 6.1.1. erfolgt nun die Veranschaulichung der gemessenen Werte in Form eines Diagramms, daß die per Laser ermittelten Stempelwege und die manuell gemessenen Flossenhöhen (Abb. 49) gegenüberstellt.

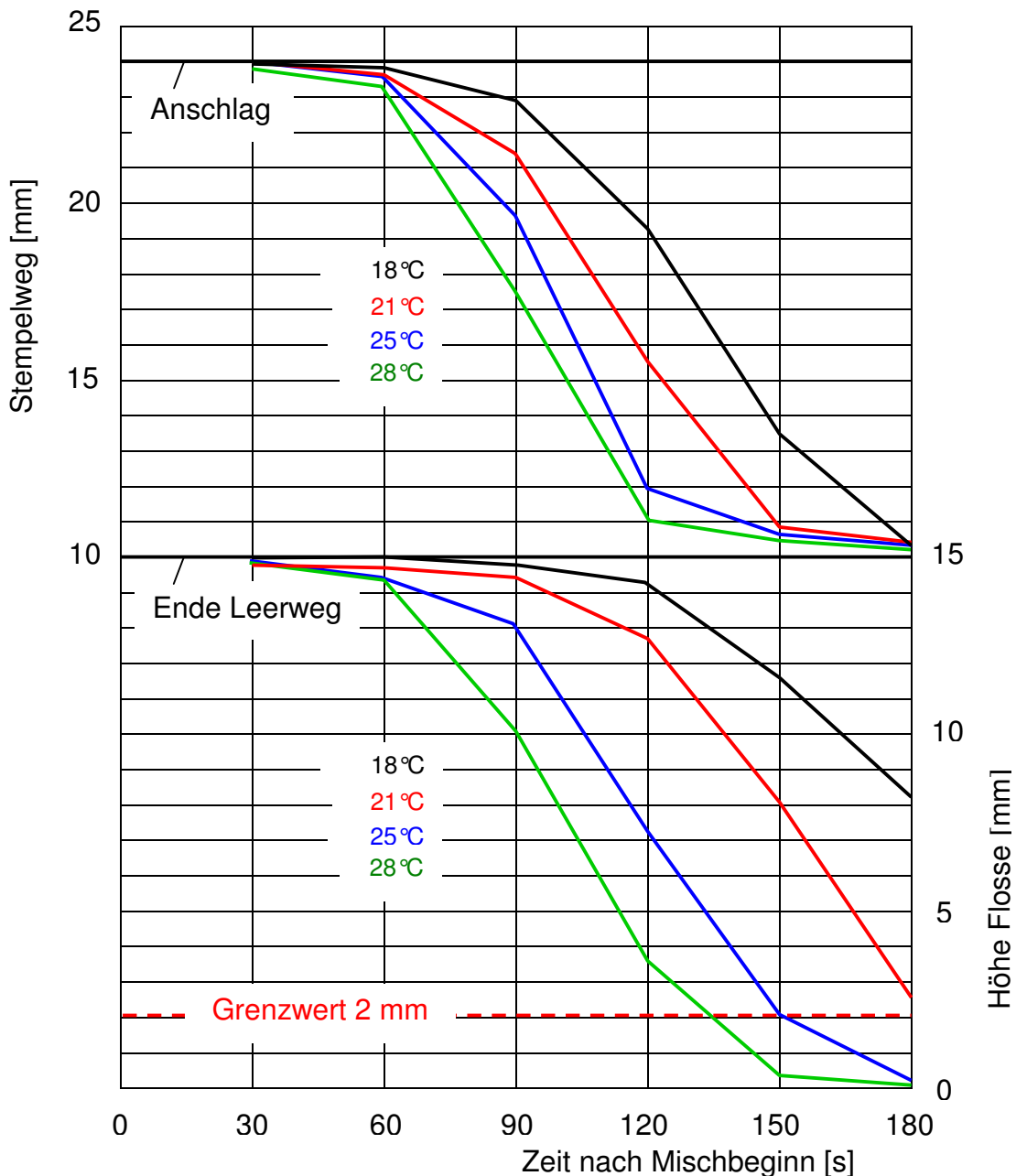


Abb. 49: Impregum Garant L Duo Soft, Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn bei den 4 Materialtemperaturen

Wie im vorhergehenden Kapitel ist sowohl beim Stempelweg als auch bei der Flossenhöhe ein deutlicher Einfluss der Temperatur des Versuchsmaterials zu erkennen. Höhere Materialtemperatur führt zu kürzeren Stempelwegen bis zum Stempelstillstand und geringeren Flossenhöhen.

Beim Weg bis zum Stempelstillstand (Abb. 49, oberer Teil) ist ein deutlicher Abfall von hohem Niveau (23,8 mm, Stempelanschlag auf Grund der hohen Fließfähigkeit) bis ca. 120 s nach Mischbeginn (bei 18 und 21 °C sogar bis 150 s) zu erkennen. Anschließend eine asymptotische Annäherung an den Nullwert. Die Relationen der Stempelwege (bei verschiedenen Materialtemperaturen) entsprechen denen der Flossenhöhen, die Mittelwerte in mm liegen jedoch auch bei Impregum unter denen der Flossenhöhen. Zu erwähnen ist, daß Stempelweg und Flossenhöhe bei diesem besonders fließfähigen Material (bei Messbeginn 30 s nach Mischbeginn) durch den Stempelanschlag begrenzt sind.

Die in Abschnitt 5.3.1. eingeführten Grenzwerte für eine Mindestflossenhöhe (Abb. 21, unterer Teil des Diagramms) von 2 bzw. 1 mm werden in Abhängigkeit von der Materialtemperatur wie folgt unterschritten (Tab. 6):

Tab. 6: Grenzwerttabelle Impregum

Temperatur	Grenzwert 2 mm	Grenzwert 1 mm
18 °C	> 180 s nach Mischbeginn	> 180 s nach Mischbeginn
21 °C	> 180 s nach Mischbeginn	> 180 s nach Mischbeginn
25 °C	ca. 150 s nach Mischbeginn	ca. 165 s nach Mischbeginn
28 °C	ca. 135 s nach Mischbeginn	ca. 145 s nach Mischbeginn

6.4.3. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe

Wie bereits in Abschnitt 5.3.2. ausgeführt, lässt sich ein Zusammenhang zwischen Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe nur indirekt mit Hilfe der Höhe der Masse im Ringspalt zwischen Rohr und Stempel herstellen.

Bekanntlich ist die Flossenhöhe abhängig von der Materialtemperatur des Versuchsmaterials und entspricht dem Strömungsverhalten in den bzw. im Haifischflossenspalt (Abb. 50):

- Bei großem Stempelweg (noch gut fließfähiges Material kurz nach Mischbeginn) ist die Flossenhöhe kleiner als die berechnete Höhe der Masse im Ringspalt.
- Bei kleinem Stempelweg ist die Flossenhöhe größer als die berechnete Höhe der Masse im Ringspalt.

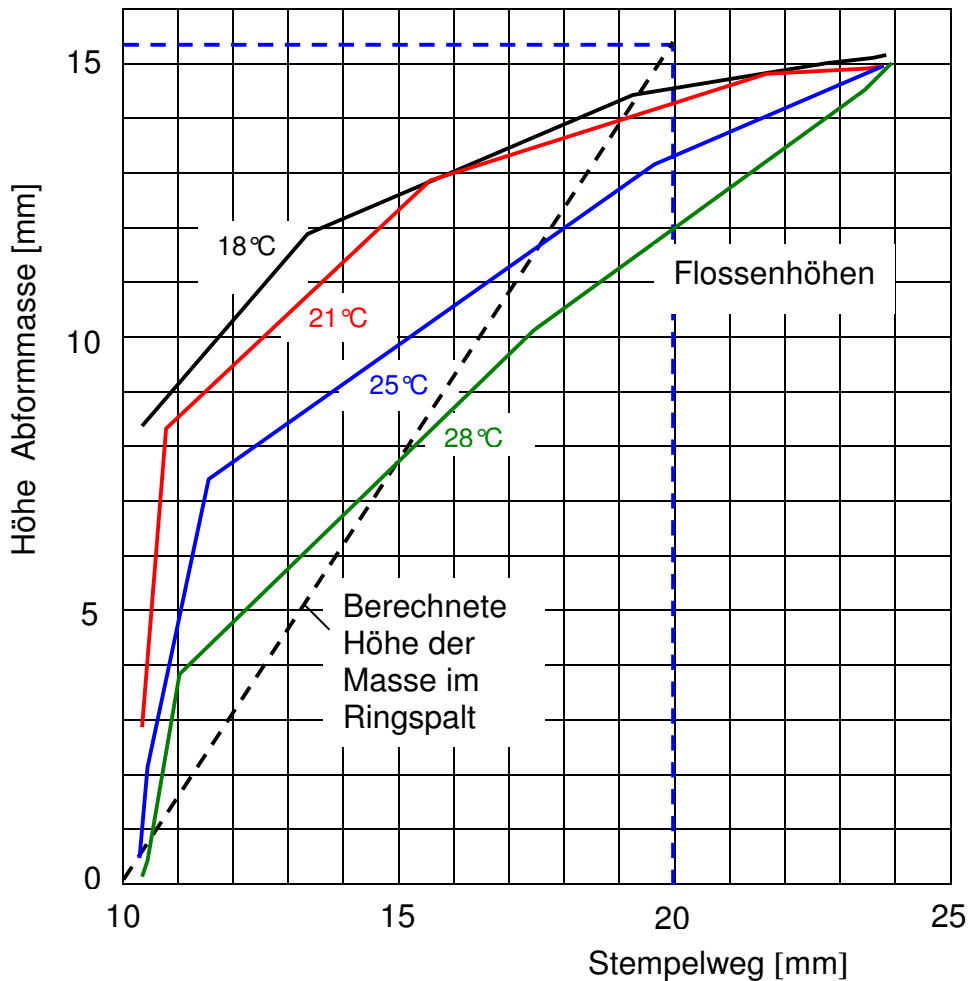


Abb. 50: Impregum Garant L DuoSoft, Höhe der Masse im Ringspalt und Flossenhöhe in Abhängigkeit vom Weg bis Stempelstillstand bei den 4 Materialtemperaturen

6.4.4. Zeit bis Stempelstillstand

Ebenso wie beim Stempelweg ist auch bei den Zeiten bis zum Stempelstillstand (Abb. 51) ein deutlicher Einfluss der Temperatur des Versuchsmaterials zu

erkennen. Höhere Materialtemperatur führt zu kürzeren Zeiten bis zum Stempelstillstand

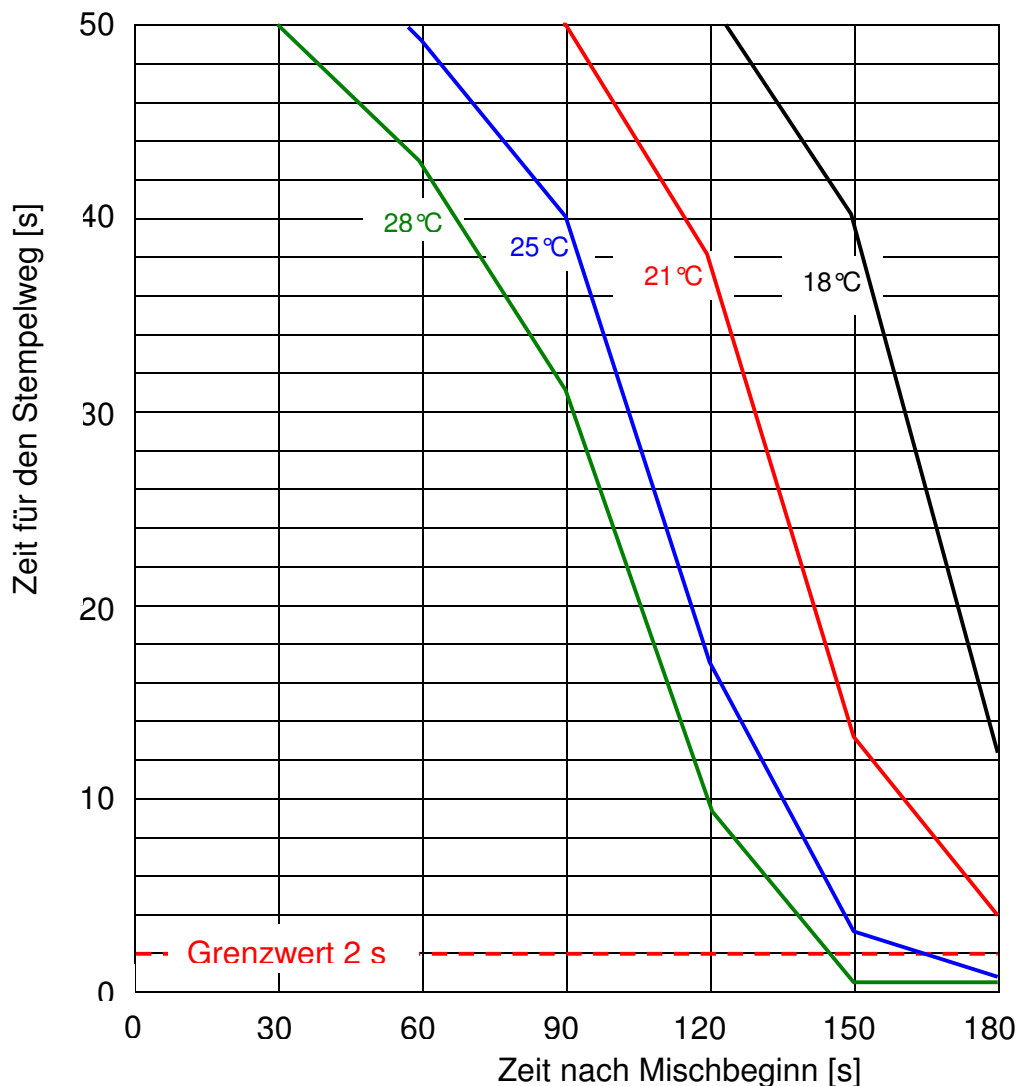


Abb. 51: Impregum Garant L DuoSoft, Zeit bis Stempelstillstand in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn bei den 4 Materialtemperaturen

Auf Grund der hohen Fließfähigkeit haben die Materialkurven einen steilen Abfall und erst über 150 s eine Annäherung (bei 25 und 28 °C) an den Nullbereich.

Auch der in Abschnitt 5.3.2. eingeführte Grenzwert für eine Mindestzeit für den Stempelweg von 2 s, in Abhängigkeit von der Materialtemperatur, wird nur bei 25 °C ca. 165 s und bei 28 °C ca. 145 s nach Mischbeginn unterschritten.

6.5. Vergleich der 4 verwendeten Abformmaterialien

Die direkte Gegenüberstellung der verwendeten Abformmaterialien am Beispiel 21 °C veranschaulicht das unterschiedliche Verhalten, insbesondere von Polyether.

6.5.1. Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe bei 21 °C

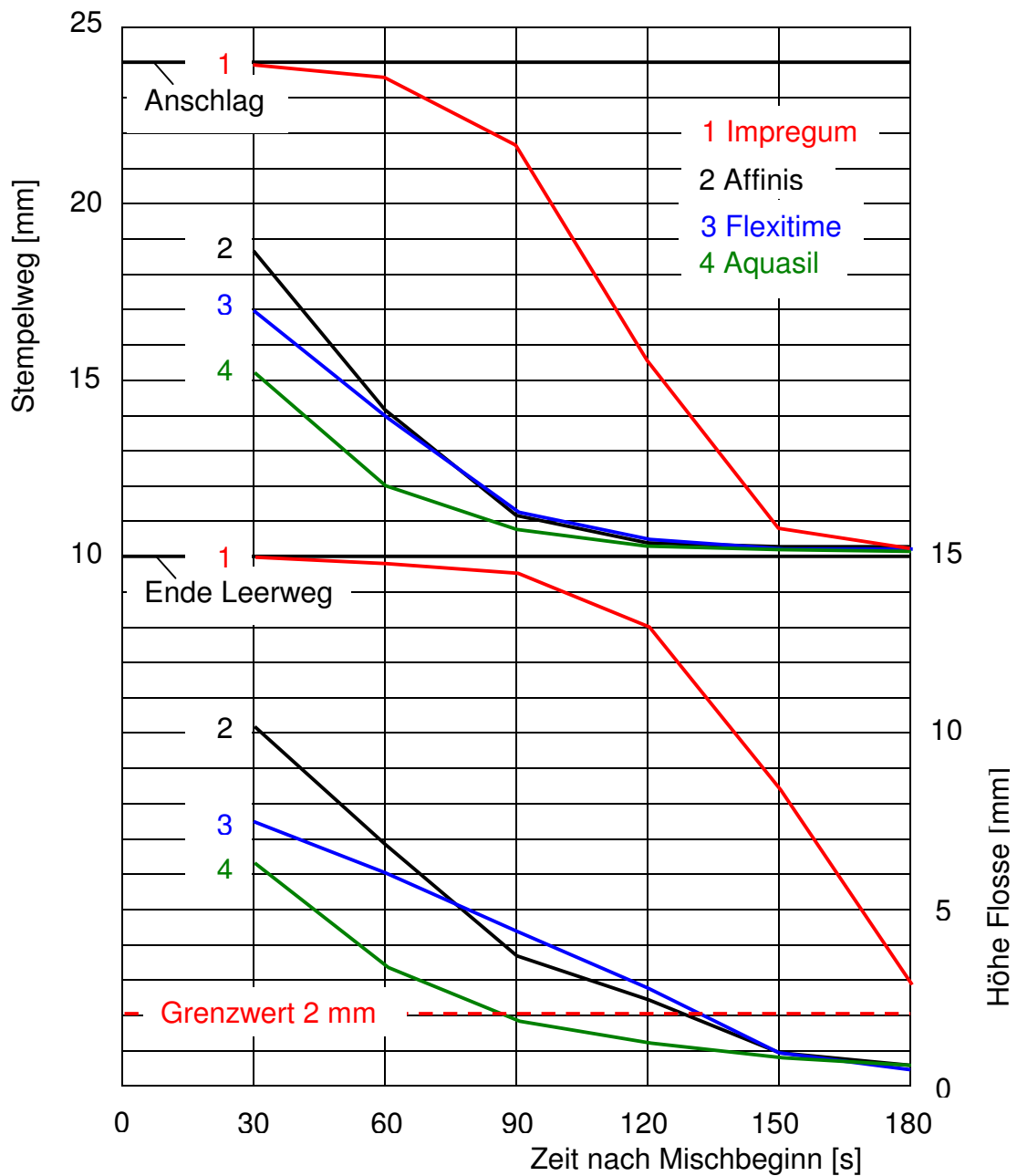


Abb. 52: Vergleich der 4 verwendeten Abformmassen bei 21 °C, Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn

Beim Weg bis Stempelstillstand (oberer Teil Abb.52) ist die deutlich höhere Fließfähigkeit von Impregum bis 120 s nach Mischbeginn zu erkennen.

Bei den Flossenhöhen (unterer Teil) wiederholt sich dieses Bild bis 150 s nach Mischbeginn, allerdings mit den bekanntlich höheren absoluten Werten.

6.5.2. Vergleich Weg bis Stempelstillstand mit Flossenhöhe bei 21 °C

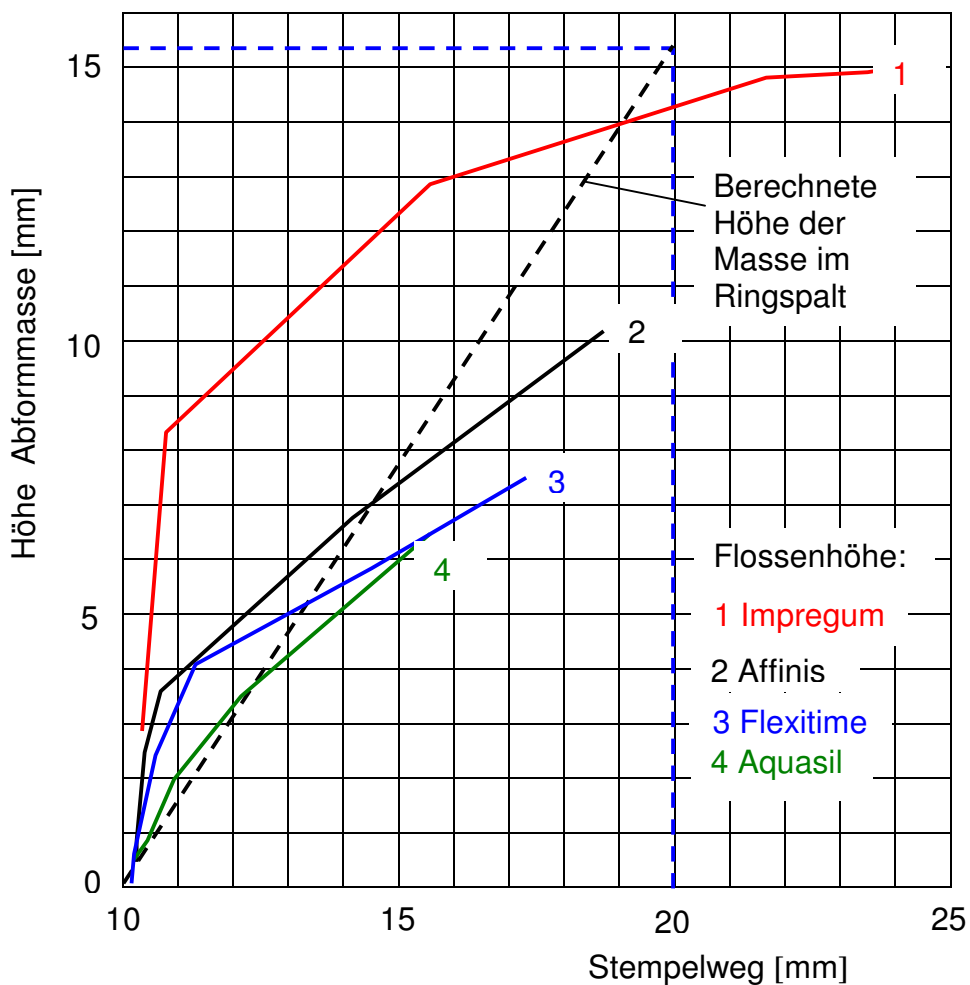


Abb. 53: Vergleich der 4 verwendeten Abformmassen bei 21 °C, Höhe der Masse im Ringspalt und Flossenhöhe in Abhängigkeit vom Weg bis Stempelstillstand

Der Vergleich der Flossenhöhen (Abb. 53) zeigt wiederum die deutlich höhere Fließfähigkeit von Impregum (Polyether) gegenüber den A-Silikonem. Bis zu einem Stempelweg von 19 mm ist die Flossenhöhe von Impregum größer als die berechnete Höhe der Masse im Ringspalt.

6.5.3. Zeit bis Stempelstillstand bei 21 °C

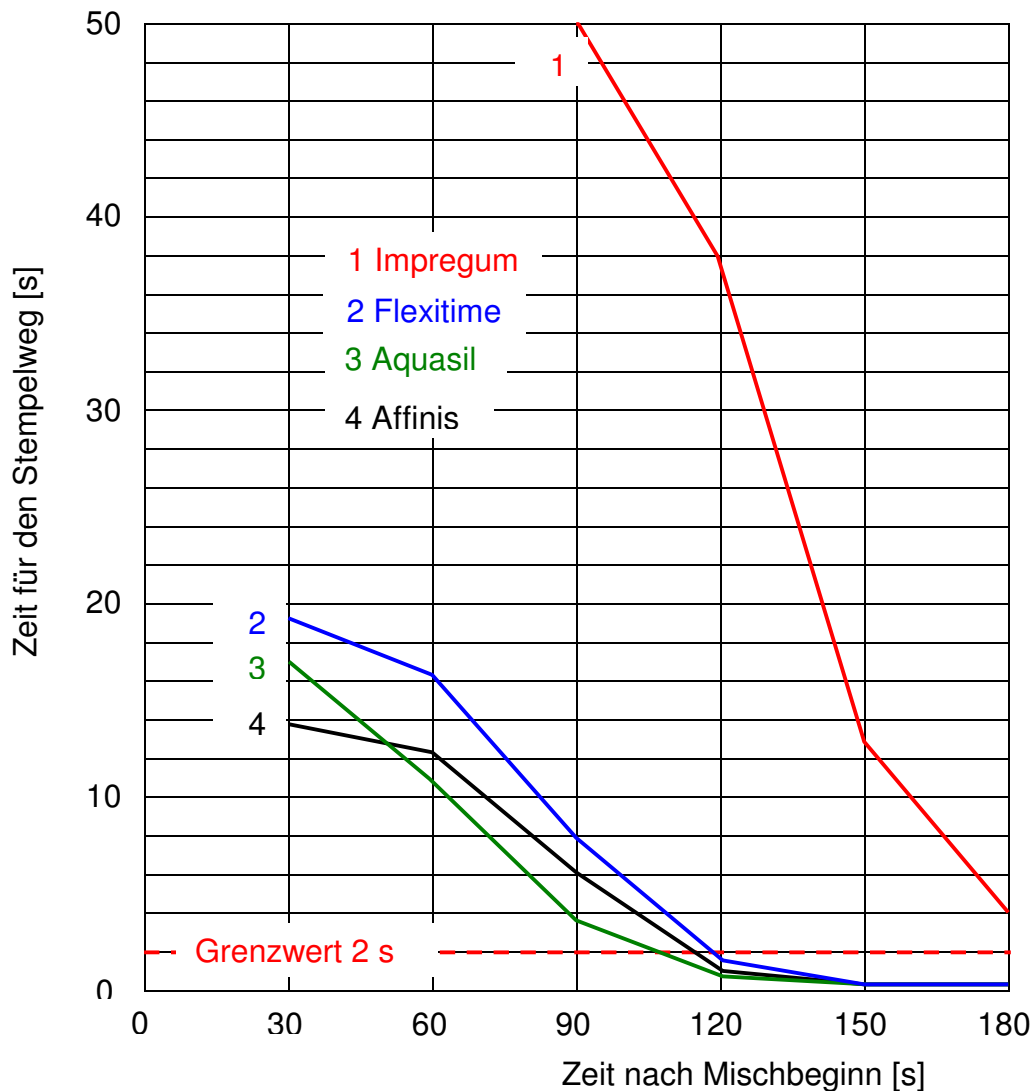


Abb. 54: Vergleich der 4 verwendeten Abformmassen bei 21 °C, Zeit bis Stempelstillstand in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn

Entsprechend dem Weg liegt auch die Zeit bis Stempelstillstand von Impregum (Abb. 54) über den Werten der anderen Abformmaterialien und außerhalb des Messbereichs.

Der im Abschnitt 5.3.2. eingeführte Grenzwert für eine Mindestzeit bis zum Stempelstillstand wird wie folgt unterschritten:

Bei Flexitime ca. 120 s, bei Affinis ca. 115 s und bei Aquasil ca. 110 s nach Mischbeginn.

6.5.4. Vergleich der Verarbeitungszeiten

Entsprechend der Mindestflossenhöhe von 2 mm wurde beim Stempelweg eine Mindesteinsinkzeit von 2 s eingeführt. Klinisch entspricht dies beim Abformen in etwa der Zeit für das Eindrücken der Zähne in das Abformmaterial im Löffel.

Auch dieser Grenzwert kann als indirekte Methode zur Bestimmung bzw. Überprüfung der vom Hersteller angegebenen Verarbeitungszeit dienen.

Tab. 7: Gegenüberstellung Verarbeitungszeiten

Handelsname	Elastomer	Verarbeitungszeit laut Hersteller (ISO 4823) 23 ± 2 °C	Verarbeitungszeit nach Flossenhöhe (Grenzwert 2 mm) bei 21/ 25 °C	Verarbeitungszeit nach Zeit bis Stempelstillstand (Grenzwert 2 s) bei 21/ 25 °C
Affinis light body	A-Silikon	85 s	ca. 130/110 s	ca. 115/110 s
Aquasil Ultra LV	A-Silikon	150 s	ca. 85/ 73 s	ca. 110/105 s
Flexitime Correct Flow	A-Silikon	150 s	ca. 130/100 s	ca. 120/110 s
Impregum Garant L DS	Polyether	120 s	> 180/150 s	> 180/145 s

Die Gegenüberstellung der unterschiedlich ermittelten Verarbeitungszeiten (Tab. 7) ergibt keine eindeutige Aussage. Zu Hinterfragen wäre allerdings bei den Herstellerangaben die Vorgehensweise bei der Ermittlung. Fehlermöglichkeiten bestehen z.B. beim subjektiven Verschieben der Lochplatte durch Fingerdruck um 0,25 mm nach EN ISO 4823 oder durch den großen Einfluß der Temperatur des Abformmaterials.

6.6. Standardabweichungen der Meßergebnisse

In Abb. 55 sind die Standardabweichungen, basierend auf jeweils 5 Wiederholungsmessungen (n=5), von Impregum (Polyether) und Affinis (A-Silikon mit den höchsten Abweichungen) bei 21 °C dargestellt. Die Werte wurden mit Hilfe des Excel- Programms ermittelt.

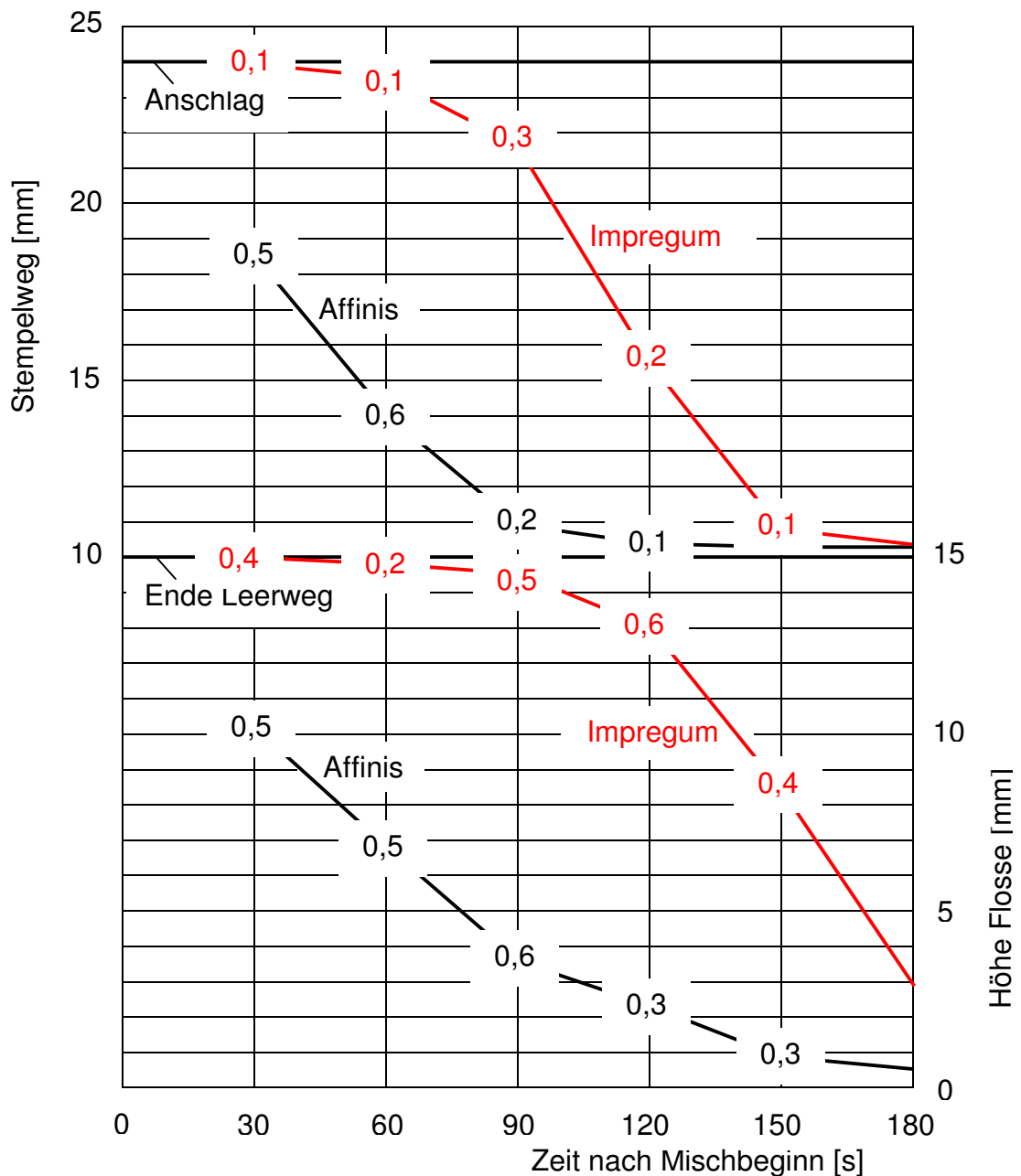


Abb. 55: Standardabweichungen in mm von Impregum und Affinis bei 21 °C, zugeordnet den Mittelwerten von Stempelweg und Flossenhöhe

Die höchsten Standardabweichungen liegen im zeitlichen Bereich des Abbindevorgangs, bei Affinis zwischen 30 und 90 s und bei Impregum zwischen 60 und 120 s.

Für eine chemische Reaktion liegen die Abweichungen auch prozentual für die untersuchte Fragestellung in einem vertretbaren Rahmen. Zu beachten ist, dass die Werte keine Aussage über die Abformgenauigkeit des Materials geben, sondern über dessen Fließverhalten. In diesem Zusammenhang kann man von einer guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sprechen, die durch die sehr kleinen Abweichungen nicht beeinträchtigt wird. Diese Aussage bezieht sich sowohl auf den Stempelweg als auch auf die Flossenhöhe, dies für alle 4 Materialien und die jeweils 4 Materialtemperaturen.

7. Diskussion

Die vorliegende Untersuchung ist eine Fortführung der Arbeiten zur Bestimmung der Fließeigenschaften von elastomeren Abformmaterialien mit Hilfe des Haifischflossentests der Firma 3M Espe durch Integration der Vorrichtung für den Haifischflossen-Test in einen Versuchsaufbau (Abb. 11). Der Versuchsaufbau hat eine Laser-Wegmesseinrichtung zur kontinuierlichen Wegmessung des in die abbindende Abformmasse einsinkenden Stempels und eine Heizvorrichtung für die Haifischflossen-Vorrichtung.

Der Haifischflossentest selbst ist eine seit Jahren bekannte Methode zur Feststellung und zum Vergleich der Fließeigenschaften leichtfließender Abformmaterialien. Erste Veröffentlichungen stammen aus dem Jahr 1997 [35]. Zur besseren Anpassung an die klinischen Bedingungen wurden im Laufe der Jahre z. B. Spaltbreite, Stempelgewicht, Vorrichtungs- und Materialtemperatur sowie Zeit nach Mischbeginn variiert [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 15, 16, 17, 28, 33, 34]. Insbesondere die Verkleinerung des Spalts von 2 auf 1 mm soll die Unterscheidung zwischen leichtfließenden Abformmaterialien verbessern.

Aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungsbedingungen und Abformmaterialien lassen sich die Ergebnisse aus der Literatur nur im Einzelfall mit den Ergebnissen dieser Untersuchung vergleichen. Grundlegende Erkenntnisse, wie z.B. die bessere Fließfähigkeit von Polyether im Vergleich zu A-Silikon, bestätigen sich weitgehend.

Der Haifischflossentest in heutiger Konzeption [12] ist ein einfach durchzuführender Vorgang mit guter Reproduzierbarkeit (siehe Kapitel 6.6.).

Anzumerken ist allerdings ein relativ hoher Materialverbrauch von einer 50 ml Kartusche für eine Messreihe (5 Messungen pro untersuchter Zeit nach Mischbeginn und Temperatur zur Bildung der Mittelwerte).

Die gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bezieht sich sowohl auf den Stempelweg als auch auf die Flossenhöhe, dies für alle 4 Materialien und die jeweils 4 Materialtemperaturen. Die höchste Standardabweichung (siehe Kapitel 6.6.) liegt bei Impregum (Polyether) bei 90 s und z.B. bei Affinis

(A-Silikon) bei 60 s nach Mischbeginn. Die höchste Abweichung tritt also jeweils während des Abbindens auf.

Die Inbetriebnahme und Erprobung des Versuchsaufbaus (Abb. 11) mit der integrierten Vorrichtung für den Haifischflossen-Test in heutiger Konzeption, der Heizvorrichtung und Laser-Wegmessung des in die abbindende Abformmasse einsinkenden Stempels, konnte erfolgreich durchgeführt werden.

Während mit dem herkömmlichen Haifischflossen-Test nur die abgebundene Flosse vermessen werden kann, war es mit diesem Versuchsaufbau möglich, zusätzlichen Erkenntnisse über das Fließverhalten der Abformmaterialien während der Abbindezeit zu gewinnen.

Bei der **Durchführung der Messung des Stempelweges** in Abhängigkeit von der Zeit ab Messbeginn (jeweils 30, 60, 90, 120, 150 und 180 s nach Mischbeginn) hat sich herausgestellt, daß die Messung im 100 ms-Takt erforderlich ist. Dies gilt sowohl für den Beginn der Messung zur Erfassung des Stempel-Leerweges (bis zum Auftreffen auf der Abformmasse) als auch für die Zeit des Einsinkens des Stempels in die Abformmasse.

Die Materialkurven (Kapitel 6.1.1., 6.2.1., 6.3.1. und 6.4.1.) wurden nur für eine Zeit von 65 s ab Messbeginn dargestellt, da die Aufzeichnung des erreichten Gleichgewichts-Zustandes keine weiteren Erkenntnisse gebracht hat. Auf die Darstellung der ursprünglichen Messprotokoll-Kurven, je nach Material über einen Zeitraum von 240-300 s, wurde deshalb verzichtet.

Zur Veranschaulichung der Messergebnisse wurden verschiedene graphische Darstellungen gewählt. Das Diagramm **Weg bis Stempelstillstand** in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn zeigt die zu erwartende materialabhängige Abnahme der Stempelwege, entsprechend dem fortschreitenden Abbindeprozeß des Abformmaterials.

Die Gegenüberstellung der **Flossenhöhen** in Abhängigkeit von der Zeit nach Mischbeginn zeigt einen entsprechenden degressiven Verlauf. Im Hinblick auf die klinischen Anforderungen im Sulkus (Spalt zwischen Zahn und Zahnfleisch).

wird ein Grenzwert für eine Mindestflossenhöhe von 2mm eingeführt.

Die Begrenzung der Zeit ab Mischbeginn durch diesen Grenzwert kann als indirekte Methode zur Bestimmung der Verarbeitungszeit genutzt werden.

Im Folgenden wird ein **Vergleich der Flossenhöhen** (Tab. 8) mit einer entsprechenden Untersuchung von J. Benchimol et al., Tufts University, Boston 2005 diskutiert [4].

Tab. 8: Vergleich Flossenhöhen zu Beginn der Verarbeitungszeit

Handelsname	Elastomer	Flossenhöhe 30 s nach Mischbeginn, bei 21 °C (eigene Messung)	Flossenhöhe 25 s nach Mischbeginn, vermutlich bei RT (Uni Boston) [4]
Affinis light body	A-Silikon	10,2 mm	7,6 mm
Aquasil Ultra LV	A-Silikon	6,3 mm	4,4 mm
Flexitime Correct Flow	A-Silikon	7,5 mm	9,4 mm
Impregum Garant L DS	Polyether	15,0 mm	15,5 mm

und am Ende der vom Hersteller angegebenen Verarbeitungszeit

Handelsname	Verarbeitungszeit lt. Hersteller, 23 ± 2 °C	Flossenhöhe bei VZ lt. Hersteller, bei 21 °C (eigene Messung)	Flossenhöhe bei VZ lt. Hersteller, vermutlich bei RT (Uni Boston) [4]
Affinis light body	85 s	4,1 mm	1,9 mm
Aquasil Ultra LV	150 s	0,8 mm	1,9 mm
Flexitime Correct Flow	150 s	1,0 mm	2,7 mm
Impregum Garant L DS	120 s	13,0 mm	14,9 mm

Der Vergleich zeigt geringe Übereinstimmung sowohl zu Beginn als auch am Ende der vom Hersteller angegebenen Verarbeitungszeit.

Signifikant ist die aus beiden Tabellen ersichtliche überlegene Fließfähigkeit des Polyethers gegenüber A-Silikon, insbesondere am Ende der Verarbeitungszeit.

Der **fehlende direkte Zusammenhang zwischen Weg bis Stempelstillstand und Flossenhöhe** ist in dem konstruktiven Aufbau der Haifischflossen-Vorrichtung (s. Abb. 16), auf Grund der in Kapitel 5.3.2. beschriebenen Stromteilung, begründet. Die vom einsinkenden Stempel verdrängte Abformmasse steigt nicht nur in dem, für die Haifischflosse vorgesehenen, Spalt von 1 mm auf, sondern größtenteils in dem ca. 3 mm breiten Ringspalt zwischen Stempel und Rohr. In der folgenden Tabelle 9 sind die wesentlichen Vor- und Nachteile der beiden Messverfahren nochmals gegenübergestellt.

Tab. 9: Gegenüberstellung Messung Flossenhöhe und der Laser-Wegmessung

	Messung Flossenhöhe	Laser-Wegmessung
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - einfache, mechanische Versuchsvorrichtung ohne Zusatzeinrichtungen - einfache Versuchsdurchführung - Messergebnisse trotz Stromteilung vergleichbar - direkte Messung 	<ul style="list-style-type: none"> - keine subjektive Messung - rechnergestützte Laser-Wegmessung mit Datenaufzeichnung und -auswertung - kontinuierliche Aussage über das Fließverhalten während des Abbindeprozesses
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - subjektive Handvermessung der Flossenhöhe mit Schieblehre und Messprotokoll - nur Aussage über den Endzustand nach Abschluß des Abbindeprozesses - keine Aussage über den Abbindevorgang 	<ul style="list-style-type: none"> - aufwendiger Versuchsaufbau mit zusätzlicher Messeinrichtung - aufwendige Versuchsdurchführung - Stromteilung der integrierten Haifischflossenvorrichtung verhindert den direkten Zusammenhang zwischen Stempelweg und Flossenhöhe - Bei gleichem Stempelweg unterschiedliche Flossenhöhe möglich - indirekte Messung

Eine Verbesserung der kontinuierlichen Messung mit Hilfe des Lasers wäre z.B. eine Direktmessung der wachsenden Haifischflosse, welche in ihrer Höhe durch die Haifischflossen-Vorrichtung erst ab ca. 30 mm begrenzt ist.

Der **Zeitpunkt des Stempelstillstands** wurde graphisch ermittelt, da die Vielzahl der geringfügig schwankenden Messwerte (Messung im 100 ms-Takt) die rechnerische Feststellung des Erreichens des Gleichgewichts-Zustandes erschwert hat.

Die Messergebnisse, sowohl beim Stempelweg als auch bei der Flossenhöhe, haben den großen **Einfluß der Temperatur des Abformmaterials auf die Abbindezeit** bestätigt. Die Herstellerangaben für die Lagerung des

Abformmaterials sind unterschiedlich:

Affinis 15-23 °C, Aquasil 10-24 °C, Flexitime ≤ 25 °C und Impregum 18-25 °C.

Bei den A-Silikonen ist eine niedrige Lagerungstemperatur im Hinblick auf die Verarbeitungszeit günstig und auch vertretbar, da sich die Konsistenz nur geringfügig ändert. Allerdings empfindet der nicht anästhesierte Patient eine kühle Abformmasse als unangenehm. Umgekehrt führen Temperaturen ab 25 °C zu einer flüssigeren Konsistenz.

Bei dem Polyether Impregum führt eine untere Temperatur von 18 °C bereits zu einer derartigen Konsistenzzunahme, daß das Material sich schwer aus der Kartusche pressen lässt.

Eine **mögliche Verbindung zwischen Benetzungs- und Fließigenschaften** der verwendeten Abformmaterialien wird durch Gegenüberstellung der initialen Kontaktwinkel zu Beginn der Verarbeitungszeit [30] und der Stempelwege 30 s nach Mischbeginn in Tab. 10 überprüft.

Tab. 10: Vergleich Benetzungs- und Fließigenschaften

Handelsname	Elastomer	Initialer Kontaktwinkel* zu Beginn der Verarbeitungszeit	Stempelweg 30 s nach Mischbeginn bei 21/25 °C
Affinis light body	A-Silikon	75°	18,6/18,5 mm
Aquasil Ultra LV	A-Silikon	78°	15,3/14,5 mm
Flexitime Correct Flow	A-Silikon	93°	17,2/16,4 mm
Impregum Garant L DS	Polyether	58°	23,8/23,8 mm

* < 90° hydrophil, > 90° hydrophob

Bei den A-Silikonen der Tab. 10 ist kein Zusammenhang zwischen Benetzungs- und Fließigenschaften zu erkennen. Bestätigt hat sich dagegen die sehr gute

Fließfähigkeit von Polyether verbunden mit einer hohen initialen Hydrophilie, absolut und im Verhältnis zu den verwendeten A-Silikonem.

Bei Impregum Garant L DS kann, aufgrund der hohen Fließfähigkeit bis ca. 90 s nach Mischbeginn und dem dann innerhalb von ca. 60 s erfolgenden Übergang in den elastischen Zustand, von einem **Snap-Set-Abbindeverhalten** (siehe Kapitel 6.5.1.) gesprochen werden.

8. Zusammenfassung

Die Vorrichtung für den Haifischflossentest der Firma 3M Espe zur Prüfung der Fließfähigkeit von elastomeren Abformmaterialien wurde in einen, von der Sektion Medizinische Werkstoffkunde und Technologie des Universitätsklinikums Tübingen entwickelten Versuchsaufbau, integriert. Dieser Versuchsaufbau, kombiniert mit einer Laser-Wegmesseinrichtung zur zeitaufgelösten Ermittlung des Stempelweges und einer Heizvorrichtung für die Haifischflossen-Vorrichtung, wurde erfolgreich in Betrieb genommen.

Untersucht wurden 4 verschiedene Abformmaterialien, 3 A-Silikone und 1 Polyether, von unterschiedlichen Herstellern. Durch zeitlich gestaffelte Versuchsreihen zu den 6 Zeiten 30, 60, 90, 120, 150 und 180 s nach Mischbeginn konnte das Fließverhalten der Abformmaterialien während des Abbindevorgangs dargestellt werden. Außerdem ergab sich auf diesem Wege durch Festlegung von Auswertungsparametern (Grenzwerte für Mindestflossenhöhe und Mindesteinsinkzeit des Stempels) die Möglichkeit zur Definition der Verarbeitungszeit. Die Messergebnisse haben weiterhin den großen Einfluss der Ausgangs- bzw. Lagertemperaturen der verwendeten Abformmaterialien bei 18, 21, 25 und 28 °C auf ihre Fließfähigkeit bzw. ihr Abbindeverhalten bestätigt.

Die kontinuierliche, rechnergestützte Bestimmung des Stempelweges ist eine entscheidende Verbesserung gegenüber der bisherigen manuellen Messmethode zur Bestimmung der Flossenhöhe (Haifischflossentest). Nachteilig ist jedoch, daß aufgrund der Stromteilung in der Haifischflossen-Testvorrichtung kein direkter Zusammenhang zwischen der Lasermessung und der bisherigen Handvermessung besteht. Daraus folgert, dass eine direkte, kontinuierliche Lasermessung der wachsenden Flosse erfolgen sollte.

Bestätigt hat sich ebenfalls die aus anderen Untersuchungen bekannte, sehr gute Fließfähigkeit von Polyether. Diese ist verbunden mit einer hohen initialen Hydrophilie. Durch die hohe, nach Mischbeginn lang anhaltende Fließfähigkeit von Impregum Garant L DuoSoft und den dann innerhalb kurzer Zeit erfolgenden Übergang in den elastischen Zustand kann von einem Snap-Set-Abbindeverhalten des Polyethers der Firma 3M Espe gesprochen werden.

9. Literaturverzeichnis

1. *Aboushala A., Hassan M., Doherty E.*
Tufts University School of Dental Medicine, Boston, MA, USA
1928 Flow Under Pressure of Six Impression Materials Using Shark-Fin Device
www.iadr.confex.com/iadr/2004Hawaii/techprogram/abstract_47578.htm
2. *Abuasi H.A., McCabe J.F., Carrick T.E., Wassell R.W.*
Displacement Rheometer: a method of measuring working time and setting time of elastic impression materials.
J. Dent. 21, 360-366 (1993)
3. *Benchimol J., Perry R., Kugel G., Ferreira S.*
Tufts University School of Dental Medicine, Boston, MA, USA
3048 Flow of Impression Materials with 2 mm Slit at End-Working-Time.
www.iadr.confex.com/iadr/2005Balt/techprogram/abstract_63230.htm
4. *Benchimol J., Perry R., Kugel G., Hoffmann J.*
Tufts University School of Dental Medicine, Boston, MA, USA
3082 Impression Materials Flow with 1mm Slit at End-Working-Time.
www.iadr.confex.com/iadr/2005Balt/techprogram/abstract_63173.htm
5. *Benchimol J., Perry R., Kugel G., Hallas M.*
Tufts University School of Dental Medicine, Boston, MA, USA
3083 Flow of Eight Impression Materials with 2 mm slit after 25 sec.
www.iadr.confex.com/iadr/2005Balt/techprogram/abstract_63217.htm
6. *Broome J.C., Burgess J.O. and Lawson N.C.*
UAB School of Dentistry, Birmingham, AL, USA and Louisiana State University, Tulane University, New Orleans, USA.
0324 Flow of fast and regular set elastomeric impression materials.
www.iadr.confex.com (2006)
7. *Chapman J.L., Cote R., Burgess J.o..*
Louisiana State University Health Sciences Center, New Orleans, USA
1899 The Skarkfin Test for heavy and light body impression materials.
www.iadr.confex.com/iadr/2005Balt/techprogram/abstract_61915.htm
8. *Coccia E., Rappelli G., Scalise L., Pallotto L., Putignano A.*
Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy
0323 Comparison of Impression Materials Using Shark-Fin Test.
www.iadr.confex.com (2006)
9. *DIN EN ISO 4823*
Elastomere Abformmassen, Zahnheilkunde
Normenausschuß Dental (NADENT) im DIN (2001)

10. *Espe Dental-AG*
Die Präzisionsabformung - ein Leitfaden für Theorie und Praxis
ESPE Dental AG, Seefeld, 2.Auflage (2002)

11. *Fa. 3M ESPE Deutschland.*
Das Abformmaterial Impregum.
www.cms.3m.com (1995-2005)

12. *Fa. 3M ESPE Deutschland.*
Haifischflossentest macht Fließfähigkeit von Abformmaterial erstmals
sichtbar
www.cms.3m.com (2006)

13. *Fa. disynet Brüggen.*
Lasertriangulations-Wegaufnehmer. www.sensoren.de

14. *Gehm L.*
Einführung in die Rheologie
ProRheo GmbH, Althengstett (2004)

15. *Hader S., Kuppermann B., Ranftl D., Klettke T.*
3M ESPE AG., Seefeld, Germany
0607 Flow of Fast-Setting Light Bodied Impression Materials During
Working Time.
www.iadr.confex.com (2005)

16. *Kim M.S., Doherty E.H., Kugel G.*
Tufts University School of Dental Medicine, Boston, MA, USA
624 Flow Under Pressure of Four Impression Materials Using Shark-
Fin Device
J Dent Res 80 (AADR Abstracts) 2001

17. *Klettke T., Ranftl D., Kuppermann B.*
3M ESPE AG., Seefeld, Germany
2465 Comparison of Different Types of Impression Materials.
www.iadr.confex.com (2006)

18. *Leßmann V.*
Abformgenauigkeit hydrophilisierter und konventioneller Elastomere im
trockenen und feuchten Milieu.
Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen (1999)

19. *Ludwig P., Niedermeier W.*
Prothetik
Georg Thieme Verlag Stuttgart (2002)

20. *Mansfield M.A., Wilson H.J.*
Elastomeric Impression Materials
British Dental Journal, 106-110 (1972)
21. *Marxkors R.*
Lehrbuch der zahnärztlichen Prothetik
Hanser München-Wien (1991)
22. *Marxkors R., Meiners H.*
Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde
Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV-Hanser Köln München (2001)
23. *McCabe J.F., Arikawa H.*
Rheological Properties of Elastomeric Impression Materials Before and
During Setting. J Dent Res 77(11), 1874-1880 (1998)
24. *McCabe J.F., Carrick T.E.*
Rheological Properties of Elastomers during Setting.
J Dent Res, 1218-1222 (August 1989)
25. *Meiners H., Lehmann K. M.*
Klinische Materialkunde für Zahnärzte
Carl Hanser Verlag München Wien (1998)
26. *Meiners H.*
Eigenschaft und Genauigkeit von elastomeren Abformmaterialien
ZWR, 87. Jahrgang, Nr. 9 (1978)
27. *Nave S. B.*
Untersuchung von Polyetherabformmaterial *Impregum Penta Soft*
Dissertation Justus-Liebig-Universität Gießen (2000)
28. *Richter B., Kuppermann B., Führer C., Klettke T.*
3M Espe, Seefeld, Germany
0142 Flow Properties of Light Bodied Impression Materials During
Working Time.
www.iadr.confex.com/iadr/eur04/techprogram/abstract_50838.htm
29. *Rupp F, Axmann D., Jacobi A., Groten M., Geis-Gerstorfer J.*
Hydrophilicity of elastomeric non-aqueous impression materials during
setting.
Dental Materials 21, 94-102 (2004)
30. *Rupp F, Lee H-R, Axmann D, Groten M, Geis-Gerstorfer J.*
Quantifizierung der Benetzungseigenschaften von hydrophilierten
A-Silikonem und Polyethern während der Applikationsphase.
DZZ 60, 587-592 (2005)

31. *Schramm G.*
Einführung in Rheologie und Rheometrie.
Verlag Gebr. Haake GmbH, Karlsruhe (1995)
32. *Schwenzer N.*
Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde, Band 3 Prothetik und Werkstoffkunde.
Georg Thieme Verlag (1994)
33. *Stipho S., Maiolo C., Perry R., Kugel G.*
Tufts University, Boston, MA, USA
0412 Flow of Impression Materials Using Different Slit Sizes During Working-Time.
www.iadr.confex.com/iadr/2006Orld
34. *Stipho S., Maiolo C., Sharma S., Perry R., Kugel G.*
Tufts University, Boston, MA, USA
0413 Flow of Impression Materials Using REALITY-Method with 1,0 mm Slit-Size.
www.iadr.confex.com/iadr/2006Orld/techprogram/abstract_73519.htm
35. *Vaughin V, Kugel G, Perry R und Noonan S.T*
Tufts University School of Dental Medicine, Boston, MA, USA
3292 Measuring Flow of Elastomeric Impression Materials Using the Shark-Fin Device
J Dent Res 76 (IADR Abstracts) 1997
36. *Wilson H.J.*
A method of Assessing the Setting Characteristics of Impression Materials.
British Dental Journal, 536-540 (1964)
37. *Wilson H.J.*
Elastomeric Impression Materials
British Dental Journal, 277-283 (1966)
38. *Wirz J.*
Klinische Material- und Werkstoffkunde
Quintessenz Verlags GmbH, Berlin (1993)
39. *Wirz J, Jäger K, Schmidli F.*
Abformung in der zahnärztlichen Praxis
Gustav Fischer Verlag Stuttgart (1993)
40. *Wirz J, Naef V, Schmidli F.*
Moderne Elastomere in neuen Darreichungsformen und Verarbeitungssystemen - Eine vergleichende Materialprüfung.
Teil 1 und 2, Quintessenz 49, 4 und 5, 403-409 und 513-520 (1998)

41. *Wirz J, Schmidli F.*
Moderne Elastomere - Wichtige physikalische Eigenschaften.
Teil 1: Material und Methoden, Rheogramme.
Quintessenz 5, 959-967 (1989)
42. *Wirz J, Schmidli F.*
Moderne Werkstoffe zur Abformung und Bissregistrierung.
ZWR 113. Jahrg. 2004, Nr. 4
43. *Wöstmann B.*
Zum derzeitigen Stand der Abformung in der Zahnheilkunde
Habilitationsschrift, Quintessenz Verlags GmbH, Berlin (1998)

10. Danksagung

Herrn Professor Dr. Jürgen Geis-Gerstorfer danke ich für Überlassung dieses Themas, die Bereitstellung und Nutzungsmöglichkeit der Einrichtungen der Sektion Medizinische Werkstoffkunde & Technologie, sowie die freundliche Betreuung dieser Arbeit.

Bei Herrn Dr. Frank Rupp bedanke ich mich für die sehr geduldige und umfassende Unterstützung, sowie wertvolle Anregungen zu dieser Arbeit.

Herr G. Wedenig hat durch die Entwicklung es Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Fließfähigkeit von Abformmaterialien sowie eines rechnergestützten Weg-Meßprogramms die Voraussetzung zur Durchführung dieser Arbeit geschaffen. Hierfür meinen Dank.

Frau C. Schille hat mich dankenswerterweise bei der Einarbeitung in die verschiedenen Rechner-Programme und mit gutem Rat unterstützt.

Ich bedanke mich ebenfalls bei allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Sektion Medizinische Werkstoffkunde & Technologie für die Unterstützung beim Aufbau der Versuchseinrichtungen, bei der Durchführung der Untersuchungen und besonders für das angenehme Arbeitsklima.

Des weiteren bedanke ich mich bei der Firma 3M Espe für die Bereitstellung der Haifischflossentest-Versuchsvorrichtung und der benötigten Abformmaterialien.

11. Lebenslauf

- Geboren am 28.3.1980 in München
- Grundschulen in München und Stuttgart
- Reifeprüfung 29.6.1999 am Elly-Heuss-Knapp Gymnasium in Stuttgart
- Krankenpflegepraktikum vom 13.9. - 14.11.1999 an der Sportklinik Stuttgart
- Sanitätsausbildung Teil A + B und Ausbildung zum Rettungssanitäter im 1. Halbjahr 2000 beim DRK in Stuttgart
- Praktika in zahntechnischen Labors
- Hospitation am Marienhospital Stuttgart in der Abteilung Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie während der Semesterferien
- Studium der Zahnmedizin 10 Semester vom WS 2000/01 bis SS 2005 an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen mit der zahnärztlichen Prüfung am 29.11.2005
- Approbationsurkunde Regierungspräsidium Stuttgart vom 5.12.2005
- Promotionsarbeit an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde Tübingen, Sektion Medizinische Werkstoffkunde & Technologie
- Tätigkeit als Vorbereitungsassistentin ab 1.5.2006.