

Aus der
Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Tübingen
Abteilung Poliklinik für Kieferorthopädie

Inaugural-Dissertation

**Elektronische Messung und Registrierung von
Kiefergelenkgeräuschen mittels Joint Vibration Analysis-
Methodenüberprüfung und retrospektive explorative
Untersuchung bei gesunden Probanden und Patienten
mit juveniler idiopathischer Arthritis**

**zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhardt Karls Universität
zu Tübingen**

vorgelegt von

Seufert, Julia

2020

Dekan: Professor Dr. B. J. Pichler

1. Berichterstatter: Professor Dr. Dr. A. Godt
2. Berichterstatter: Privatdozent Dr. F. Hüttig

Tag der Disputation: 10.07.2020

**Meinen Eltern, Bruder, Hannah
meiner Oma**

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Einführung in die Thematik	1
1.2 Kiefergelenkgeräusche	1
1.2.1 Zustände der Kiefergelenke und assoziierte Kiefergelenkgeräusche	1
1.2.2 Epidemiologie der Kiefergelenkgeräusche	3
1.2.3 Untersuchungsmethoden/Diagnostik des Kiefergelenks und der Kiefergelenkgeräusche	4
1.2.3.1 Funktionsdiagnostik	5
1.2.3.2 Elektronische Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen und Unterkieferbewegungen	6
1.3 Juvenile idiopathische Arthritis	9
1.3.1 Definition	9
1.3.2 Subtypen der JIA	9
1.3.3 Bedeutung der JIA für das Kiefergelenk	10
1.3.3.1 Epidemiologie	10
1.3.3.2 Symptome	10
1.3.3.3 Diagnostik	11
1.3.3.4 Therapie	13
1.4 Fragestellung und Zielsetzung	15
2. Material und Methoden	17
2.1 Material	17
2.1.1 Probanden	17
2.1.2 Messsystem und Software	19
2.1.2.1 Hardware/Module für die Messung	19
2.1.2.1.1 Joint-Vibration-Analysis	19
2.1.2.1.2 JT-3D Elektrognathograph	21
2.1.2.2 Software und Datenverarbeitung	22
2.2 Methoden	22
2.2.1 Organisation	22
2.2.1.1 Anlegen einer Probandendatei	22
2.2.1.2 Vorbereitung des Probanden für die Messung	23
2.2.1.3 Durchführung der Messung	24

2.2.2 Fehlerquellen in der Messung	25
2.2.3 Graphische Darstellung der Vibrationen innerhalb der Software	27
2.2.4 Bestimmung der Kiefergelenkgeräusche/Vibrationen innerhalb der Software im Rahmen der Dissertation	31
2.2.5 Bedeutung der Items (Messgrößen)	33
2.3 Statistische Auswertung	36
2.3.1 Statistische Auswertung der Methodenprüfung	37
2.3.1.1 Überprüfung auf Normalverteilung: Schiefe und Kurtosis	37
2.3.1.2 Bestimmung der Messvariabilität mittels Variationskoeffizient	37
2.3.1.3 Bestimmung der Reliabilität mittels Intraklassenkorrelationen	38
2.3.2 Statistische Auswertung der explorativen Untersuchung: Überprüfung der Werte auf Signifikanz zwischen JIA und Non-JIA	38
2.3.2.1 Mann-Whitney-U-Test	39
3. Ergebnisse	40
3.1 Überprüfung auf Normalverteilung mittels Schiefe und Kurtosis	40
3.1.1 Übersicht der Verteilung der Daten; Schiefe und Kurtosis	41
3.1.2 Statistische Darlegung der Verteilung der Daten und der Variationskoeffizienten (CV in %) für jedes Item	42
3.2 Ergebnisse der Methodenprüfung	56
3.2.1 Errechnung der Variationskoeffizienten zur Beurteilung der Messvariabilität	56
3.2.2 Errechnung des ICC zur Beurteilung der Reliabilität	58
3.3 Ergebnisse der explorativen Untersuchung- Überprüfung der Messwerte zwischen JIA und Non-JIA-Probanden auf Signifikanz	60
3.3.1 Übersicht: Mediane, Interquartilsabstände und p-Werte im Vergleich zwischen den Gruppen	61
3.3.2 Statistische Darlegung der Überprüfung der Werte auf Signifikanz zwischen JIA/Non-JIA-Probanden in den einzelnen Items	62
4. Diskussion	76
4.1 Diskussion der Methodenprüfung	76
4.1.1 Vergleich mit anderen Studien/Publikationen	80
4.1.2 Vergleich mit anderen Methoden	84
4.1.3 Schlussfolgerung für die Methodenprüfung	86
4.1.4 Limitationen der Methodenprüfung	86

4.2 Diskussion der explorativen Untersuchung: Signifikanz der Messwerte zwischen JIA und NON-JIA- Probanden	88
4.2.1 Vergleich mit anderen Studien und Publikationen	89
4.2.2 Schlussfolgerung für den Vergleich zwischen JIA/Non-JIA	94
4.2.3 Limitationen für den Vergleich zwischen JIA/NON-JIA	95
5. Zusammenfassung	96
6. Literaturverzeichnis	98
7. Erklärung zum Eigenanteil	108
8. Anhang	109
8.1 Überprüfung auf Signifikanz JIA/Non-JIA mittels Mann-Whitney-U-Test	109
8.2 Vollständige Statistik des ICC (Reliabilität)	123

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CI	Konfidenzintervall
CV	Variationskoeffizient (Coefficient of Variation)
CMD	Craniomandybuläre Dysfunktion
DVT	Digitale Volumentomographie
EVG	Elektrovibratographie
Gd	Gadolinium (Kontrastmittel im MRT)
Hz	Hertz, Einheit der Frequenz
ICC	Intraklassenkorrelation
ILAR	International League of Associations for Rheumatology
IQR	Interquartilsabstand
JIA	Juvenile idiopathische Arthritis
JVA	Joint Vibration Analysis
KG	Kiefergelenk
KM	Kontrastmittel
Li.	Links
Med.	Median
MRT	Magnetresonanztomographie
Non-JIA	Gruppe der gesunden Probanden ohne juvenile idiopathische Arthritis
Pa	Pascal, Einheit, entspricht 1 N/m^2
PSA	Panoramaschichtaufnahme
RDC/TMD	Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders
Re.	Rechts

1. Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik

Kiefergelenkgeräusche sind in der Bevölkerung weit verbreitet. Oft sind solche Geräusche ohne Krankheitswert [143], können aber auch mögliche Zeichen einer craniomandibulären Dysfunktion (CMD) sein [169]. Derzeit gibt es verschiedene Diagnostik-Verfahren für CMD [3, 28, 104], welche Kiefergelenkgeräusche im Rahmen klinischer Untersuchungen miterfassen. Daneben lassen sich Geräusche der Kiefergelenke (KG) elektronisch-instrumentell registrieren. Die elektronische Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen und sich daraus ableitende Zustände der Kiefergelenke und Diagnosen sind gut untersucht [21, 36, 51, 55, 56, 58, 59, 93, 100, 105, 115, 164, 166]. Neben CMD können auch andere Allgemeinerkrankungen die Funktion des craniomandibulären Systems beeinflussen, unter anderem die juvenile idiopathische Arthritis (JIA) [39]. Kiefergelenkgeräusche sind auch bei einer JIA als Symptom beschrieben und untersucht [64, 78, 107]. Bisher wenig untersucht bleibt aber bei diesem Patientenkollektiv eine elektronische Registrierung der vorhandenen Kiefergelenkgeräusche und Symptomatik. In aktueller Literaturrecherche konnte bisher eine Studie gefunden werden, die sich mit der Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen bei an JIA erkrankten befasste [121].

1.2 Kiefergelenkgeräusche

1.2.1 Zustände der Kiefergelenke und assoziierte Kiefergelenkgeräusche

Kiefergelenkgeräusche treten häufig im Rahmen einer CMD auf [29, 126] und werden als Grund einer Dysfunktion oder pathologischer Zustände der Kiefergelenke angesehen [53, 102, 124]. Jedoch können Geräusche auch

isoliert bei für CMD asymptomatischen auftreten [30] oder sogar bei blander Bildgebung vorhanden sein [54, 58, 139]. Vielfältige weitere geräuschproduzierende Ereignisse werden genannt, unter anderem intermittierender Synovialfluss, Formdefekte und Formunregelmäßigkeiten der Gelenkflächen [112] oder Ligamentveränderungen [35].

Um den jeweiligen Zustand des Kiefergelenks aus den entsprechenden Kiefergelenkgeräuschen ableiten zu können, wurden viele wissenschaftliche Untersuchungen vorgenommen, darunter eine Korrelation zwischen Kiefergelenkgeräuschen und Autopsie-Exemplaren und/oder Arthrographie [53, 65, 123, 124, 164], Bildgebung [138], oder der klinischen Untersuchung [75]. Andere Wissenschaftler registrierten Kiefergelenkgeräusche elektronisch und korrelierten diese mit einer Bildgebung [58, 100], Arthrographie [59] oder einer Spectralanalyse [50].

Prinz und Ng [112] (mit Verweis auf [114]) teilten Kiefergelenkgeräusche in drei Kategorien ein: Ein Knacken (einzelne Geräusche von kurzer Dauer), Knarren (mehrere Geräusche von kurzer Dauer) und Krepitation (ein langandauerndes Geräusch), wobei diese von ihnen weiter unterteilt wurden aufgrund ihrer Amplitude, Frequenz, Lateralität und Muster.

Ein isoliertes Knacken oder reziprokes Knacken wurde häufig gefunden bei einer Discusverlagerung mit Reposition [50, 53, 65, 100, 123], Krepitation hingegen bei degenerativen Gelenkveränderung und/oder Discus-Perforationen und/oder Arthrose [50, 75, 124, 164], oder bei anteriorer Discusverlagerung ohne Reposition [100, 123]. Oft hat ein Knacken keinen Krankheitswert [143] und erscheint auch bei Gesunden [29, 30] als Variante der Discusposition [143] und kann sich mit der Zeit wieder verflüchtigen [86]. Das häufigste Kiefergelenkgeräusch ist ein Knacken durch anteriore Discusverlagerung mit Reposition [29, 117, 131, 143]. Es entsteht während der initialen oder intermediären Mundöffnungsphase durch ruckartiges Aufspringen des Kondylus der betroffenen Seite über den Hinterrand des Discus. Kommt noch ein zweites, meist leiseres Knacken bei terminalem Mundschluss dazu, spricht man von reziprokem Knacken [143]. Es kann nur dann auftreten, wenn das Knacken in

der Mundöffnungsphase bereits vorhanden war und impliziert eine Absetzung des Discus vom Kondylus [31].

Bei der akuten Discusverlagerung ohne Reposition kommt es zur Verhinderung der Translation des Kondylus durch fehlende Reposition des Discus. Klinisch imponiert dies durch eine eingeschränkte Mundöffnung (Closed Lock) mit funktionsabhängigen Schmerzen [130] und Deflexion [143]. Bei einer Chronifizierung ist ein Knacken nicht mehr vorhanden, anamnestisch war dies vor der Mundöffnungseinschränkung vorhanden [31]. Eine Aufhebung der discocondylären Einheit ist pathognomonisch für eine Chronifizierung [130].

Die Arthrose, eine degenerative Gelenkerkrankung, induziert durch Überbelastung der Kiefergelenke, führt zunächst zum Knorpelabbau der bedeckenden Gelenkflächen bis hin zur Spaltbildung. Im weiteren Verlauf sind auch die subchondral gelegenen Knochen betroffen. Die Bildgebung zeigt Erosionen, Destruktionen, Deformationen und Osteophytenbildung. Folge ist eine Aufrauung der Gelenkstrukturen, fakultativ mit Krepitation [34, 143].

Die rheumatische Arthritis stellt eine chronische Entzündung bisher unklarer Genese dar. Das den Discus und die Gelenkoberfläche überdeckende Granulationsgewebe (Pannus) wächst von peripher nach zentral und zerstört dabei zunächst Knorpel, dann knöcherne Anteile der Gelenkkopf- und Fläche bis hin zur Ankylose aufgrund einer Fibrosierung. Imponierendes Gelenkgeräusch stellt im fortschreitenden Stadium die Krepitation dar [34].

1.2.2 Epidemiologie der Kiefergelenkgeräusche

In der Literatur findet sich eine große Streubreite über Angaben der Prävalenz von Kiefergelenkgeräuschen bei erwachsenen Probanden, die auf CMD untersucht wurden [2, 30, 38, 92, 129, 172]. Innerhalb dieser Studien weisen Gelenkgeräusche eine Prävalenz von 13% bis 36% auf. Kinder und Jugendliche wurden oftmals in eigener Altersgruppe auf Symptome der CMD getestet [32, 46, 47, 52]. Innerhalb dieser Studien reichte die Prävalenz der Kiefergelenkgeräusche von 14,7 bis 23%. Die Studie von Kopp et al. [76] konnte hingegen bei keinem der 99 untersuchten 5-9-jährigen Kinder ein

Knacken oder Reiben wahrnehmen. Frauen/Mädchen weisen häufiger Kiefergelenkgeräusche auf als Männer/Jungen [32, 38, 47, 52, 86, 92, 129, 131]. Seneazda et al. [131] untersuchten 198 Probanden im Alter von 73-75 Jahren: Knackgeräusche waren bei 32,8% feststellbar. Bezüglich der Krepitation lag der höchste Wert bei Frauen mit 6,3% bei feinem Reiben, wohingegen 3,9% der Männer bei grobem Reiben die niedrigste Prävalenz repräsentierten.

Es gibt wenige Studien, die sich mit der Prävalenz isolierter KG-Geräusche befassen. In einer Studie von Pöllmann [110] konnte, je nach gewähltem Verfahren (Eigenanamnese, Auskultation, mit Phonogramm registriert), stark differierende Prävalenzen isolierter Kiefergelenkgeräusche festgestellt werden. Laut Türp et al. [143] zeigt diese Studie stellvertretend für andere Studien zum einen eine hohe Prävalenz isoliert auftretender Kiefergelenkgeräusche auf, zum anderen verdeutlicht sie die Abhängigkeit der Prävalenz von der gewählten Untersuchungsmethode. Auch andere Autoren [111, 119, 131] kritisieren die fehlende Vergleichbarkeit solcher Studien, unter anderem aufgrund unterschiedlicher Vorgehensweisen bei der Befunderhebung. Zur Befunderhebung propagieren verschiedene Autoren [28, 118, 128, 131] die *Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders* (RDC/TMD) [28], ein international anerkanntes Diagnostik-System für CMD, das als valides und reliables Verfahren anerkannt ist [62, 63, 153].

1.2.3 Untersuchungsmethoden/Diagnostik des Kiefergelenks und der Kiefergelenkgeräusche

Kiefergelenkgeräusche können mittels Stethoskop, Auskultation, Palpation [169] oder elektronisch registriert werden [51]. Bestimmte Pathologien, unter anderem degenerative Erkrankungen oder Störungen der Discusfunktion lassen sich mittels invasiver Arthroskopie darstellen [99]. Daneben stehen bildgebende Verfahren in der CMD-Diagnostik wie die Panoramaschichtaufnahme (PSA), die Magnetresonanztomographie (MRT), Computertomographie (CT) und Digitale Volumentomographie (DVT). Während die MRT den Goldstandard für die

Weichgewebstdarstellung der Kiefergelenke darstellt, kann mittlerweile die DVT knöcherne Strukturen bei nahezu gleicher Bildqualität wie eine CT darstellen. Vorteil der DVT gegenüber der CT stellt die vergleichsweise niedrigere Strahlenbelastung dar. Die MRT kann mit Kontrastmittel (unter anderem Gadolinium) angewandt werden. Die PSA ermöglicht in zweidimensionaler Darstellung eine erste Übersicht der Kiefergelenke. Darauf können allerdings nur fortgeschrittene Destruktionen wie Erosionen oder ausgeprägte Osteophytenbildung der Kondylen dargestellt werden [8]. Neben der Strahlenbelastung limitieren Kosten und Invasivität oben genannte diagnostische Mittel [59], Unbehagen beim Untersuchungshergang oder Kontrastmittelallergie werden als zusätzliche Probleme genannt [54].

1.2.3.1 Funktionsdiagnostik

Kiefergelenkgeräusche werden oftmals im Rahmen klinischer Funktionsanalysen erfasst [3, 12, 28, 104]. Die RDC/TMD [28], ein 1992 veröffentlichtes Diagnose-Protokoll für CMD [85], erfasst Kiefergelenkgeräusche zum einen in einem für Patienten standardisierten Fragebogen, zum anderen in einer klinischen Untersuchung mittels Palpation und Auskultation eines kalibrierten Untersuchers. Die RDC/TMD sind auf einer Internetpräsenz derzeit in 21 Sprachen verfügbar [155], seit 2006 auch ins Deutsche übersetzt [63, 96]. Im Jahre 2014 wurde die RDC/TMD überarbeitet und in *Diagnostic Criteria DC/TMD* umbenannt [127].

Die RDC/TMD [28] ist ein 2-achsiges System; Achse I beinhaltet physische Diagnosen, Achse II berücksichtigt die psychologische Verfassung und schmerzbedingte Einschränkungen [85].

Innerhalb der RDC/TMD werden Kiefergelenkgeräusche unterteilt in Kiefergelenkknacken, Krepitation, und diese wiederum in grobes und feines Gelenkreiben [96]. Die sich aus der Anamnese und der Untersuchung ergebenden Befunde werden sodann zur genauen Diagnosefindung herangezogen [27], die in Achse I, Gruppe zwei und drei zu finden sind [28]. In Gruppe zwei wird ein Knacken zur Diagnose „Discusverlagerung“, in Gruppe drei wird Krepitus zur Diagnosefindung herangezogen [85].

Tabelle: Achse I Diagnosen nach RDC/TMD

Achse I Diagnosen
Gruppe 1: Myofasciale Beschwerden
Gruppe 2: Discusverlagerung a) Discusverlagerung mit Reposition b) Discusverlagerung ohne Reposition mit eingeschränkter Mundöffnung c) Discusverlagerung ohne Reposition ohne eingeschränkte Mundöffnung d) keine der Diagnosen der Gruppe II
Gruppe 3: Andere Gelenkerkrankungen a) Kiefergelenkarthralgie b) Kiefergelenkarthritis c) Kiefergelenkarthrose d) Keine der Diagnose der Gruppe III

Tabelle 1: Achse I nach RDC/TMD [28] [85]

Auskultation und Palpation werden dennoch als subjektive Methoden zur Erfassung von Kiefergelenkgeräuschen angesehen, dahingegen die elektronische Registrierung als objektive Methode [125].

1.2.3.2 Elektronische Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen und Unterkieferbewegungen

In den 1980-ern befassten sich Wissenschaftler mit verschiedenen Systemen zur elektronischen Aufnahme von Kiefergelenkgeräuschen: Sie zeichneten Kiefergelenkgeräusche mittels Schwingungswandler [37], Sonographie [44] oder mit Hilfe eines Stethoskops auf [50], um sie danach mittels Spektralanalyse zu charakterisieren. Christensen [17] beschreibt diese Studien allerdings als „irreführend“ und „bedeutungslos“ aufgrund fehlerhaft angewandtem Instrumentarium und Mathematik. Daneben wurden Kiefergelenkgeräusche mit Hilfe eines Mikrofons aufgezeichnet [37], welche jedoch Artefakte und Hintergrundgeräusche enthielten [14]. Andere Studien [24, 161], in welchen unter anderem Beschleunigungssensoren zur Aufnahme mit

nachfolgender Charakterisierung der Geräusche durch Spectralanalyse vollzogen wurde, trugen laut Christensen [17] maßgeblich zur Entwicklung der Elektrovibratographie (EVG, entspricht Joint Vibration Analysis [16]) bei. Im Gegensatz zu Mikrofonen können in JVA verwendete Gewebe-Beschleunigungssensoren Umgebungsgeräusche ausblenden [66].

In den späten 1980-ern entwickelte Bioresearch Associates zusammen mit John Radke den JT-3D-Elektrognathographen, der in der Lage war, Unterkieferbewegungen in allen 3 Ebenen des Raums zu erfassen. Störungen im Bewegungsmuster bei zum Beispiel einer Discusverlagerung veranlassten sie, in den 1990-ern das Dos-basierte SonoPAK (Bioresearch, Assoc., Milwaukee, WI. USA) zur elektronischen Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen zu entwickeln und zu vermarkten [66]. Das DOS-basierte SonoPAK entwickelte sich zum Windows®-basierten Joint-Vibration Analysis [158]. Neben diesem System vermarktet die Firma Myotronics auf ihrer Website [156] ein ähnliches System für die elektronische Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen, den sogenannten „K7 Sonographen“ [133].

Die genaue Funktionsweise von EVG (also Joint Vibration Analysis, kurz JVA) basierend auf physikalischen Hintergründen wird von Christensen eingehend in zwei Publikationen erläutert [14, 15]. Er beschreibt dort, dass Kiefergelenkgeräusche im eigentlichen Sinne Vibrationen darstellen, mit charakteristischer Frequenz und Amplitude jeder Vibration, aus welcher ein Frequenzspektrum gebildet werden kann [14].

Wissenschaftler sammelten mit JVA generierte Daten und verglichen sie mit damals gängigen Methoden zur Diagnostik craniomandibulärer Dysfunktionen [66]: Ishigaki et al. [54] starteten dafür eine „Versuchsreihe“: Asymptomatische und symptomatische Probanden (mit Schmerzen, Limitationen, und Kiefergelenkgeräuschen) für CMD wurden anamnestisch befragt, klinisch untersucht, es wurde eine Tomographie angefertigt sowie bei einigen davon eine Arthrographie und Videofluoroskopie, um die entsprechenden intraartikulären Störungen zu sichern. Diese waren Discusverlagerung mit und ohne Reposition, Discusverlagerung mit Perforation sowie nur Perforation. Das Patientenkollektiv wurde herangezogen für weitere Studien, in welchen

Kiefergelenkgeräusche der Probanden mittels elektronischer Registrierung (EVG) aufgezeichnet wurden. Zunächst wurde die Sensitivität und Spezifität untersucht, mit akzeptablem Ergebnis [55]. Des Weiteren wurden oben genannte Zustände mit dafür charakteristischen Werten der mittels JVA aufgezeichneten Kiefergelenkvibrationen assoziiert [56, 58-60].

Zu Beginn dieser „Versuchsreihe“ korrelierten die Wissenschaftler die elektrovibratographischen Werte symptomatischer Probanden mit positiven und negativen arthrographischen Befunden für (oben genannte) intraartikuläre Störungen. Die diagnostische Sensitivität und Spezifität für EVG (um intraartikuläre Störungen zu verifizieren) betrug dabei 75% und 77% [55]. Ishigaki et al. [56] verglichen weiters symptomatische mit asymptomatischen Probanden und erhielten somit charakteristische Werte für Vibrationen für eine Bildgebung ohne Besonderheiten [58], Discusverlagerung mit und ohne Reposition [59], und degenerative Gelenkerkrankungen und/oder Perforationen [56]. Zudem verglichen sie Daten verschiedener Messgrößen (im Folgenden Items genannt) aus SonoPAK mit den Zuständen der entsprechenden Kiefergelenke, welche sich aus der Arthroskopie und Tomographie ergeben haben. Die diagnostische Sensitivität für die Elektrovibratographie (SonoPAK) betrug dabei 76,3%-85,7%, die Spezifität 59%-79,9 [60] abhängig vom oben genannten, entsprechenden Zustand [66].

Im Laufe der Zeit befassten sich zahlreiche Studien mit der Reliabilität und Validität des Joint Vibration Analysis [60, 132, 133, 171] oder mit den für verschiedene Gelenkzustände typischen Wellenformen und Vibrationsmustern, welche sich aus dem Frequenzspektrum einer Vibration ergeben [21, 105]. Andere Wissenschaftler beschrieben für verschiedene Gelenkzustände assoziierte Werte der verschiedenen frequenz-, integral- und amplitudenassoziierten Messgrößen (Items) der Vibrationen (Integral>300Hz, >300/<300Hz Ratio, Peak Amplitude, Peak Frequency, Med. Frequency [51, 93]). Oder Wissenschaftler befassten sich mit der Richtung einer Discusverlagerung (anterior, anteriomedial oder medial), abhängig von der übertragenen Energiemenge von der ipsilateralen auf die kontralaterale Seite [115]. Die Studie von Mazzetto et al. [93] konnte aufzeigen, dass bestimmte

Werte der Items charakteristisch sind für verschiedene Zustände der Kiefergelenke und eine Analyse der Kiefergelenkgeräusche mittels Joint Vibration Analysis die Art der Dysfunktion vorschlägt und somit zur Therapiefindung verhilft.

1.3 Juvenile idiopathische Arthritis

1.3.1 Definition

Die Juvenile idiopathische Arthritis (JIA) ist eine Erkrankung mit unbekannter Ätiologie, bei der sich Gelenkentzündungen unter 16 Jahren erstmals manifestieren und mindestens 6 Wochen andauern [109]. Zur Diagnosestellung müssen andere Erkrankungen, die eine ähnliche Symptomatik aufweisen, ausgeschlossen worden sein [149]. Einige wenige serologisch bestimmbare Marker, wie zum Beispiel der Rheumafaktor und die antinukleären Antikörper spielen bei der Klassifikation der juvenilen idiopathischen Arthritis eine Rolle und lassen eine Zuordnung zu Subgruppen zu. Im Erwachsenenalter werden diese zur Diagnosestellung herangezogen [141].

1.3.2 Subtypen der JIA

JIA lässt sich anhand der Klassifikation durch ein Komitee der „*International League of Associations for Rheumatology (ILAR)*“ abhängig von Gelenkbefallmuster sowie Verlauf in 7 unterschiedliche Subtypen einteilen [109]. Diese international etablierte Einteilung der ILAR hat die ab den 70-er Jahren in Europa gültige Klassifikation der „*European league against Rheumatism*“ EULAR verdrängt [97] und wurde seit 1995 [33] zweimal überarbeitet [108, 109].

Klassifikation (ILAR)

Polyarthrititis mit positivem Rheumafaktor
Polyarthrititis mit negativem Rheumafaktor
Systemische Arthritis
Oligoarthrititis <ul style="list-style-type: none">• Extended (nach 6 Monaten sind mehr als vier Gelenke betroffen)• Persistent (ein bis vier Gelenke sind betroffen im Krankheitsverlauf)
Psoriasisarthritis
Enthesitis-assoziierte Arthritis
Undifferenzierte Arthritis: kann nicht eindeutig zu 1-6 zugeordnet werden

Tabelle 2: Klassifikation der Juvenilen idiopathischen Arthritis nach ILAR [109]

Die Einteilung erfolgt nach klinischen und laborchemischen Merkmalen [109]. Die Subtypen weisen unterschiedliche Muster im Gelenkbefall auf. Es kann aber praktisch jedes Gelenk innerhalb einer Gruppe betroffen sein [146]. Ein früher Krankheitsbeginn, eine lange Krankheitsdauer, sowie die Oligo- und insbesondere die polyartikuläre Verlaufsform erhöhen das Risiko einer Kiefergelenkbeteiligung [64, 149].

1.3.3 Bedeutung der JIA für das Kiefergelenk

1.3.3.1 Epidemiologie

In einem Review [90] über die Epidemiologie der JIA, welches 34 Studien miteinbezieht, wird die Prävalenz der JIA mit 0,07-4,01 bei 1000 Kindern angegeben, die jährliche Inzidenz beträgt 0,008 bis 0,226 bei 1000 Kindern. Die Prävalenz einer Kiefergelenkbeteiligung wird mit bis zu 87% der Kinder und Jugendlichen angegeben [79]. Mädchen sind häufiger betroffen als Jungen [64].

1.3.3.2 Symptome

Eine Schwellung und Bewegungseinschränkung des entsprechenden Gelenks kann von Rötung und Überwärmung begleitet sein [141].

Die Wachstumsfuge der zur Mandibula gehörenden Kondylen befindet sich im Kontrast zu anderen (synovialen) Gelenken direkt unter dem Knorpel [4, 149]. Die durch die JIA bedingten synovialen und im Knochen der Kondylen lokalisierten entzündlichen Prozesse wirken damit direkt auf die subchondral gelegene Wachstumsfuge. Da diese eine der Hauptwachstumszonen des Unterkiefers darstellt, können sogar Wachstumsstörungen nicht nur des Unterkiefers, sondern des gesamten Gesichtsschädels auftreten. Ist nur ein Kiefergelenk betroffen, kann eine Gesichtasymmetrie (Kinnabweichung) daraus resultieren, hingegen bei Involvierung beider KG ein skelettal offener Biss. Wird dabei die Mandibula in ihrem Wachstum gehemmt, können Mikrognathie (Vogelgesicht) und Retrognathie die Folge sein [40].

Morgendliche Steifigkeit des Gelenks, Mundöffnungseinschränkungen, frontaler Engstand mit Protrusion, Okklusionsstörungen, Schmerzen und Schwierigkeiten beim Kauen, Kiefergelenkgeräusche, eine Unterkieferabweichung zur kranken Seite und Druckdolenz können weitere Symptome einer JIA mit Kiefergelenkbeteiligung darstellen [9, 41, 64]. Wachstumsstörungen der Kiefergelenke oder Symptome einer KG-Beteiligung können aber auch in vielen Fällen asymptomatisch bleiben [64, 74] oder durch nur wenige, in milder Ausprägung auffallende Symptome in Erscheinung treten [78]. Häufig bleibt eine Beteiligung der Kiefergelenke daher oft unerkannt oder wird zu spät erkannt, was bleibende Schäden der Gelenke nach sich ziehen kann, bis hin zum totalen Funktionsverlust durch Kondylolyse und Ankylose [40]. Eine frühzeitige Erkennung und Therapie einer Kiefergelenkbeteiligung der JIA-Patienten zur Prävention erheblicher potentieller Folgeschäden ist daher unabdingbar [64].

1.3.3.3 Diagnostik

Die klinische Untersuchung

Während Bechtold et al. [7] Fragebögen und klinische Funktionsanalysen zur Erfassung und Untersuchung orofazialer Symptome im Kontext einer JIA als unerprobt beschreiben, empfiehlt Kahl-Nieke [64] neben Anamnese und rheumaspezifischen Fragebögen die „klassische Funktions- und Struktur-

analyse“. Koos et al. [73]. überprüften mittels RDC/TMD erhobener klinischer Parameter und Gadolinium-unterstützter-MRT-Diagnostik in einer Studie, wie verlässlich Knacken bei Mundöffnung oder -Schluss, Druckdolenzen der Kiefergelenke und Kaumuskulatur sowie die maximale Mundöffnung und dabei auftretende Asymmetrien eine Kiefergelenkbeteiligung bei bestehender Kiefergelenkarthritis anzeigen. Eine hohe Spezifität und niedrige Sensitivität aller fünf Parameter zeigt, dass durch die alleinige klinische Untersuchung eine Kiefergelenkarthritis unerkannt bleiben kann oder sogar zu einer falsch-positiven Rate führen kann. Die alleinige klinische Untersuchung zur Detektion einer Kiefergelenkarthritis ist demnach nicht reliabel genug und sollte gegebenenfalls mit einer Gadolinium-unterstützten MRT (Gd-MRT) ergänzt werden [73, 74]. Um der Tatsache gerecht zu werden, dass eine Kiefergelenkarthritis Einfluss auf das kraniofaziale Wachstum und Funktion hat [10, 67, 94, 135, 144], wurden von einem in 2010 in Oslo gegründeten Expertengremium, der *euroTMjoint group*, fünf Empfehlungen für eine einheitliche klinische Untersuchung veröffentlicht, um prospektiv klinischen und wissenschaftlichen Belangen gerecht zu werden [136].

MRT

Das Kontrastmittel-MRT (KM-MRT) zum Nachweis einer akuten Entzündung stellt aktuell den Goldstandard dar [64, 98, 150]. Das Gd-unterstützte MRT weist hierbei eine hohe Sensivität und Spezifität auf [45, 74, 79]. Das MRT unterscheidet zwischen der chronischen und akuten Entzündung [74, 150], wobei hierfür laut Küseler et. al [78, 79] ein Kontrastmittel notwendig ist, und vermag eine akute Arthritis sowie damit einhergehende Veränderungen frühzeitig und eindeutig zu detektieren [74, 78, 79, 148]. „*Gelenkerguss, die Synovitis und das Knochenmarködem*“ charakterisieren im MRT eine frühe, aktive Arthritis, gefolgt von Erosionen [148]. Hingegen kennzeichnen eine „*Abflachung, Resorption, Verkürzung und Verbreiterung des mandibulären Köpfchens (Mikrognathie) oder Dorsalversatz (Retrognathie), Knochensklerose und Discusdislokationen*“ sowie Pannusbildung eine chronische Entzündung beziehungsweise späte Zeichen im MRT [148, 150]. In Studien konnte mit radiologischen und MRT Aufnahmen gezeigt werden, dass ein Befall der

Kiefergelenke sehr häufig ist, trotz fehlender oder unzuverlässiger klinischer Symptomatik [74, 81]. Das MRT kristallisiert sich somit als unabdingbares diagnostisches, bildgebendes Verfahren heraus, um eine Entzündung im Kiefergelenk frühzeitig zu diagnostizieren, um daraus resultierende immense Spätfolgen abwenden zu können [148]. Nachteile des MRT sind unter anderem die Kostspieligkeit, die Invasivität und die Notwendigkeit einer Sedierung bei Kleinkindern [74, 145].

Panoramaschichtaufnahme (PSA) und Digitale Volumen-Tomografie (DVT)

Die PSA stellt anhaltende chronische Veränderungen im knöchernen Kiefergelenk dar, das heißt Destruktionen und Umwandlungen des Kondylus, des Tuberculum articulare und der Fossa mandibularis, nicht jedoch eine akute Entzündung [146] oder den Status der Entzündung, aus der sich therapeutische Maßnahmen in der Folge orientieren [74]. Auch die DVT vermag nur knöcherne Strukturen darzustellen. Aufgrund oben genannter Limitationen und der zusätzlichen Strahlenbelastung der DVT und der PSA wird die KM-MRT als die bessere Alternative beschrieben [146].

1.3.3.4 Therapie

Zunächst sind Physiotherapie in Verbindung mit Nichtsteroidalen Antirheumatika (NSARs) Therapie der Wahl [146]. Als die der „*Leitlinie der Arbeitsgemeinschaft der wissenschaftlich medizinischen Fachgesellschaften e.V.*“ entlehnten Handlungsempfehlungen kommen bei der JIA neben NSARs Glucocorticoide, systemisch oder intraartikulär, sowie sogenannte „Disease Modifying Antirheumatic Drug“ (DMARD) zum Einsatz. Letztere lassen sich wiederum einteilen in Nicht-Biologika (Methotrexat, Leflunomid, Sulfasalazin) und Biologika (TNF-Antagonisten wie Etanercept, Adalimumab, Interleukin-6-Antagonisten wie Tocilizumab, Kostimulationsantagonisten wie Abatacept, Interleukin-1 und 1 β -Antagonisten) [7, 103]. Biologika wie TNF-Antagonisten kommen zum Einsatz bei Unverträglichkeit auf Methotrexat oder bei Nichtansprechen auf NSAR oder intraartikulärer Steroidgabe [25].

Abbildung: Handlungsempfehlung bei JIA

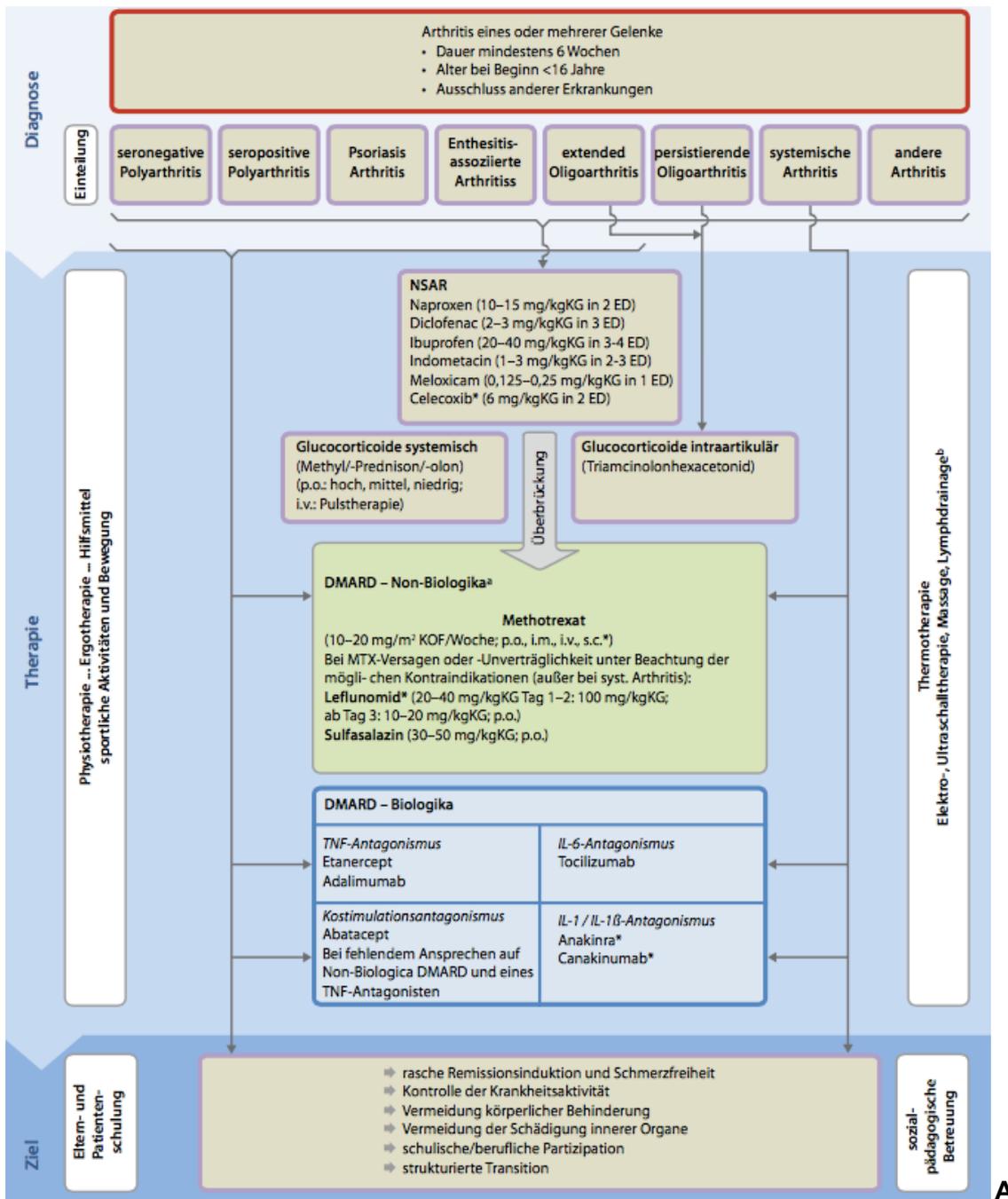


Abbildung 1: Handlungsempfehlung nach der Leitlinie Therapie der Juvenilen idiopathischen Arthritis, entnommen aus Monatsschr. Kinderheilkd. 2013 [103]

Die intraartikuläre Injektion von Glucocorticoiden ins Kiefergelenk, vorzugsweise Triamcinolonhexacetonid, gilt als sicher und effektiv [5, 7, 122, 134]. Demgegenüber stehen nicht-pharmakologische Therapieansätze als Säulen der Therapie. Eine frühe kieferorthopädische Behandlung im Hinblick auf den Erhalt der Funktion des Kiefergelenks ist essentiell. Physiotherapie sowie

Logopädie kommen unterstützend zum Einsatz. Eine Behandlung sollte auf einer interdisziplinären Zusammenarbeit von Kinderrheumatologen, Kieferorthopäden und Physiotherapie erfolgen [147]. Koos et al. [74] führten ein Klassifikationsschema für Kiefergelenkerosion bei JIA anhand vorliegender KM-MRT und DVT-Aufnahmen ein, mit dem Ziel, die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Kieferorthopädie und Kinder-Rheumatologie mittels standardisierter Befunde zu vereinfachen und dadurch Therapieansätze zu verbessern und im Verlauf anpassen zu können.

1.4 Fragestellung und Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel vorliegender Dissertation stellt eine Methodenprüfung des instrumentellen Verfahrens Joint Vibration Analysis (BioRESEARCH Assoc. Inc., Milwaukee) zur elektronischen Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen gesunder (für CMD asymptomatischer) Probanden und deren Quantifizierung dar. Im Rahmen der Methodenprüfung soll die Zuverlässigkeit der Methode des Verfahrens bei kurz aufeinanderfolgenden Messwiederholungen bestimmt werden, wobei hier die Messvariabilität und die Wiederholbarkeit (Reliabilität) der registrierten Vibrationen im Vordergrund stehen soll.

Als weiteres Ziel soll im Rahmen einer explorativen Untersuchung ermittelt werden, ob zwischen Kindern/Jugendlichen bei bestehender Diagnose einer JIA und gesunden Probanden signifikante Unterschiede der vom Gelenk emittierten, elektronisch registrierten, Geräusche, beziehungsweise Vibrationen bestehen. Die aus der elektronischen Registrierung resultierenden, für die Methodenprüfung und explorativen Untersuchung herangezogenen Items (Messgrößen) mit entsprechenden Werten für die Vibrationen jeweils für das rechte und linke Kiefergelenk, sind: 1) „Total integral“, 2) „Integral> 300Hz“, 3) „Integral<300Hz“, 4) „>300/<300Hz Ratio“, 5) „Peak Amplitude“, 6) „Peak Frequency“, 7) „Med. Frequency“

Folgende Kernfragen sollen beantwortet werden:

1. Im Rahmen der Methodenprüfung:

- wie variabel zeigen sich die Werte elektronisch registrierter Kiefergelenkvibrationen gesunder Probanden bei Messwiederholungen?
- Sind die elektronisch registrierten Werte reproduzierbar?
- Ist die Methode der elektronischen Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen mittels JVA reliabel?
- Wie stellt sich die Methode der elektronischen Registrierung im Vergleich zur konventionellen klinischen Untersuchung dar, welche Vor- und Nachteile hat dieses Verfahren?

2. Im Rahmen der explorativen Untersuchung:

- Bestehen zwischen für CMD asymptomatischen Probanden und Patienten mit diagnostizierter juveniler idiopathischer Arthritis signifikante Unterschiede der Vibrationswerte für oben genannte Items?
- Ist die Methode der elektronischen Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen bei Kindern mit juveniler idiopathischer Arthritis zur Identifikation pathologischer Gelenkzustände anwendbar?

Als technische Registriergeräte fungierten Joint Vibration Analysis [158] in Verbindung mit dem JT-3D-Elektrognathographen. JVA detektiert Vibrationen der Kiefergelenke während der Gelenkfunktion und vermag Kiefergelenkerkrankungen aufzudecken [66]. Der Elektrognathograph zeichnet Unterkieferbewegungen in allen Ebenen des Raums auf [11].

2. Material und Methoden

2.1 Material

2.1.1 Probanden

Gruppe 1: Für CMD asymptotische Probanden (Non-JIA)

Der innerhalb der Software des JVA gespeicherte Rohdatensatz umfasst graphische Darstellungen frequenz-, integral- und amplitudenassoziierter Werte für Kiefergelenkvibrationen von 55 „gesunden“ Probanden, die sich aus Studenten und Mitarbeitern der Klinik für Mund-Zahn- und Kieferheilkunde in Tübingen zusammensetzten. Davon waren 28 männlich (51%), 27 weiblich (49%) und im Alter von 18 bis 42 Jahren.

Zu Beginn der Aufzeichnungen wurden bei diesen Probanden folgende anamnestische Auffälligkeiten ausgeschlossen:

- Schmerzen und palpable Druckdolenz der Kiefergelenke sowie der Kaumuskulatur innerhalb der Mastikation oder bei forcierten Mundöffnungs- und Schlussbewegungen
- Craniomandibuläre Dysfunktion
- Ein zu starker Tiefbiss

Ein berichtetes vergangenes „Knacken“ im Bereich der Kiefergelenke sowie milde Deviationen oder Deviationen bei Mundöffnung oder -schluss wurden akzeptiert, durften aber nicht von Schmerzen begleitet sein. Hierzu wurden die Probanden vor Versuchsbeginn mündlich befragt, um oben genannte Beschwerden auszuschließen. Die Kiefergelenke wurden palpiert. Die Vibrationswerte der verschiedenen statistisch zu untersuchenden Items der jeweils fünf Messwiederholungen wurden in eine Excel-Tabelle übertragen.

Für die statistische Auswertung sollten mindestens vier Messwiederholungen pro Proband vorliegen. Innerhalb jeder Messwiederholung sollten wiederum vier vom Kiefergelenk emittierte Vibrationen in der Software markiert worden sein. Diese Kriterien erfüllten 31 Probanden, aus deren Vibrationswerten eine JMP-

Tabelle erstellt wurde. Von den 31 in die Gruppe und zur statistischen Auswertung eingeschlossenen Probanden waren 18 männlich (42%), 13 weiblich (58%) und im Alter von 20 bis 42 Jahren. Das Durchschnittsalter betrug 26,2 Jahre.

Die Untersuchung lag der Ethik-Kommission der Universität Tübingen unter der Projekt-Nr. 564/2010BO2 zur Beratung vor. Von Seiten der Kommission bestanden keine Bedenken.

Gruppe 2: Probanden mit juveniler idiopathischer Arthritis (JIA)

Dieser vollständig anonymisierte, aus der klinischen Routine entnommene Datensatz aus der Poliklinik für Kieferorthopädie Tübingen, setzte sich aus 23 konsekutiv untersuchten Kindern und Jugendlichen im Alter von 8 bis 17,5 Jahren zusammen. 40% der Jugendlichen waren männlich, 60% weiblich. Alle wiesen eine medizinisch gesicherte juvenile idiopathische Arthritis (JIA) verschiedener Subgruppen auf.

Die Verteilung auf die Subgruppen gemäß der ILAR-Klassifikation stellt sich wie folgt dar: Arthritis mit Enthesitis 17,4%, erweiterte Oligoarthritis 39,1%, persistente Oligoarthritis 17,4%, Polyarthritis mit negativem Rheumafaktor 17,4%, Polarthritis mit positivem Rheumafaktor 0%, Psoriasisarthritis 8,7%. Die Werte für Kiefergelenkvibrationen lagen zunächst in Form einer Excel-Tabelle vor. Pro Proband wurden die Werte vier markierter Vibrationen innerhalb jeweils einer Messung in eine JMP-Tabelle überführt. Zur statistischen Auswertung konnten 22 Probanden mit JIA eingeschlossen werden. Ein Proband musste aufgrund mangelnder Dateninformationen ausgeschlossen werden.

2.1.2 Messsystem und Software

2.1.2.1 Hardware/Module für die Messung

Als Messsystem dienten zwei verschiedene Module der Firma BioResearch Associates, Inc., Milwaukee, das zusammen mit der entsprechenden Software (BioPAK, Version 5.3, BioRESEARCH, Assoc., Milwaukee) betrieben wird.

Joint Vibration Analysis (BioJVA, im Folgenden nur „JVA“ genannt), erfasste die Kiefergelenkgeräusche beziehungsweise Vibrationen. Mit der zeitgleichen Anwendung des Messhelms, dem sogenannten JT-3D-Elektrognathographen dieser Firma, war eine Erfassung der Unterkieferbewegungsgeschwindigkeit, der Zuordnung der Unterkieferbewegungen im Raum sowie die Erfassung des zeitlichen Auftretens der Kiefergelenkvibrationen im Unterkieferbewegungszyklus möglich. Beide Module können auch jeweils isoliert angewandt werden. Innerhalb der Datenerhebung für vorliegende Dissertation wurden zusätzlich noch Messungen mittels BioEMG II (Elektromyographie der Kaumuskelatur) derselben Firma vollzogen. Die durch den Elektrognathographen erhobenen Daten sowie die Aufzeichnung der Muskelaktivität der Kaumuskelatur beim Schlucken mittels EMG II waren jeweils Gegenstand anderer Dissertationen [68] [11].

Da im Rahmen der Datenerhebung JVA zusammen mit dem Elektrognathographen angewandt wurde, wird in vorliegender Dissertation zum Zwecke der Vollständigkeit auch kurz auf diesen Messhelm in Verbindung mit JVA und potentielle Anwendungsfehler eingegangen.

2.1.2.1.1 Joint-Vibration-Analysis

Zur Registrierung der Kiefergelenkgeräusche beziehungsweise emittierten Vibrationen während der forciert wiederholten Mundöffnungs- und Mundschlussphasen der Probanden wurde Joint Vibration Analysis [158] zusammen mit der entsprechenden Software verwendet.

Wie der Software zu entnehmen ist, besteht JVA aus einer Verstärkerbox und einem Headset mit zwei Messfühlern (als „Kopfhörer“ imponierend), die präauriculär auf die Haut über den Kiefergelenken 15mm anterior vor dem äußeren Gehörgang der Probanden platziert werden. In den Messfühlern befinden sich in Silikon eingebettete Beschleunigungsmesser mit einer Bandbreite von 25 bis 10000Hz [171]. Das Silikon weist eine dem menschlichen Weichgewebe ähnliche Dichte auf, wodurch Hintergrundgeräusche und Artefakte durch Hautoberflächenkontakt ausgeblendet werden [66, 159]. Aus dem linken und rechten Messfühler führen zwei Kabel, die in den entsprechenden Ausgang in die Verstärkerbox gesteckt werden müssen. Die Verstärkerbox, welcher der Proband während der Aufnahme um den Hals trägt, wird per Kabel mit einem beliebigen Computer verbunden.

Abbildung: Messfühler des JVA mit Elektrognathograph



Abbildung 2: Der JT-3D-Elektrognathograph zusammen mit Joint Vibration Analysis (BioPAK, Milwaukee), im Vordergrund sichtbar sind die Messfühler ohne Verstärkerbox (Bildquelle: UKSH Poliklinik für KFO, Koos et al.).

Das Funktionsprinzip des JVA [125] basiert darauf, dass Gelenke im menschlichen Körper, wenn sie bewegt werden, aneinander reiben. Bei glatten Gelenkflächen wird dadurch eine kleine Vibration erzeugt, bei stärkerer Reibung dementsprechend eine größere Vibration. Die höchst sensiblen, in Silikon eingebetteten Beschleunigungsmesser nehmen diese mit nur minimalem Energieverlust auf [66]. Der Verstärker wandelt diese Vibrationen in ein elektrisches Signal um, welches wiederum an den PC übertragen wird und durch die BioPAK-Software graphisch dargestellt wird in Form von Amplituden-Werten gegen die Zeit in Sekunden. Der Fast Fourier Algorithmus extrahiert von jeder Amplitude die Frequenz, um ein Frequenzspektrum zu berechnen, welches in der y-Achse als Amplitude (Energie), in der x-Achse als Frequenz dargestellt wird [171]. Die klinische Interpretation der Frequenz, der Amplitude und des Frequenzspektrums einer aufgenommenen Vibration sind in den Kapiteln 2.2.4 und 2.2.5 dargelegt. Für eine zeitgleiche und regelmäßige Ausführung der Mundöffnungs- und Mundschlussphasen der Probanden sorgt ein in der Software integriertes Metronom, das die Phasen für Mundöffnungs- und Mundschlussbewegungen der Probanden in 1,5 Sekunden je Zyklus einfordert [66]. Die Gleichtaktunterdrückung wird mit 129dB (Störgeräuschunterdrückung) bei 50/60Hz angegeben [163].

2.1.2.1.2 JT-3D Elektrognathograph

Der zusätzliche Messhelm, der Jaw-Tracker-3D Elektrognathograph, der parallel die Mundöffnung und den Mundschluss des Probanden räumlich in allen drei Ebenen des Raums aufzeichnet und zudem die Geschwindigkeit der Unterkieferbewegung misst, erlaubt sowohl eine zeitliche Zuordnung der durch JVA detektierten Geräusche/Vibrationen, als auch Seitwärtsbewegungen des Kiefers zu verifizieren. Die am Messhelm angebrachten Sensoren sind laut Hersteller in der Lage, mit Hilfe des im Patientenmund angebrachten Magneten die Bewegungen des Inzisalpunktes, also des Unterkiefers, in allen Raumebenen zu erfassen sowie die Geschwindigkeit dieser Bewegungen mittels Beschleunigungsmesser in den Magnetsensoren zu ermitteln [11].

2.1.2.2 Software und Datenverarbeitung

Die Software erfasst die durch JVA und den Elektrognahtographen aufgezeichneten Vibrationen und gibt sie als graphische Darstellungen wieder. Die BioPAK-Software Version 5.3 von Bioresearch Assoc., Inc., verfügt über drei Programm-Optionen: 1) Patient Mode, 2) Record Mode und 3) Review Mode.

Im *Patient-Mode* lassen sich ermittelte Daten der Probanden anlegen, speichern und verwalten. Zudem gibt es die Option, für jeden Patienten zusätzlich Bildgebungen einer CT oder einer MRT hinzuzufügen.

Im *Record-Mode* werden die vom KG emittierten Vibrationen eines Probanden durch die Messfühler während rhythmischer Mundöffnungs- und Mundschlussbewegungen zu vorgegebenem 1,5-Sekunden-Takt in Echtzeit aufgezeichnet.

Im *Review-Mode* lassen sich die im Record-Mode aufgezeichneten Vibrationen der Probanden graphisch darstellen (siehe Kapitel 2.2.3).

2.2 Methoden

2.2.1 Organisation

2.2.1.1 Anlegen einer Probandendatei

In der BioPAK-Software wird vor der Messung eine Datei für den entsprechenden Probanden angelegt. Verschiedene Daten können abgespeichert werden: Vor- und Zuname des Probanden, das Geschlecht des Probanden, das Geburtsdatum des Probanden. Sonstiges, etwaige Ergänzungen/Informationen zum Probanden können mit freiem Text vorgenommen werden wie zum Beispiel die zuvor mit einem Lineal ermittelte maximale Mundöffnung und die Deviation. Eine Probanden-ID, mit der eine Zuordnung der Daten ohne Namen möglich ist sowie das Datum der Erstellung fügt das Programm automatisch hinzu.

2.2.1.2 Vorbereitung des Probanden für die Messung:

Zunächst werden die JVA Messfühler (Kopfhörer) am Patientenkopf über den Kiefergelenken platziert und die Verstärkerbox wird dem Probanden mittels Band um den Nacken gehängt. Die Kabel, die jeweils links und rechts aus den Messfühlern austreten, werden korrekt in die entsprechenden Ausgänge in der Verstärkerbox eingestöpselt. Rechts und links darf dabei nicht vertauscht werden. Die Kiefergelenke werden durch Palpation lokalisiert, die Messfühler werden präaurikulär auf dem Kiefergelenk angebracht. Dazu lässt sich das Headset dem Kopfumfang anpassen, es lässt sich enger oder weiter stellen. Der Bügel der Kopfhörer kann nach oben oder unten gerichtet werden. Der zum Elektrognathographen gehörende kleine quaderförmige Magnet wird mittels Wachsplättchen temporär an den Unterkieferinzisiven, teils an der Gingiva angebracht. Dabei muss die am Magneten eingebrachte Kerbe nach links zeigen. Priorität hat hierbei eine zur Bipupillarlinie ausgerichtete Platzierung, da sonst die Daten verfälscht werden.

Der Elektrognathograph wird auf dem Patientenkopf so justiert, so dass die obere Strebe des Gerüsts parallel zur Bipupillarlinie, die seitlichen Streben parallel zur Frankfurter Horizontalen sind. Für eine korrekte Platzierung des Magneten und des Messhelms gibt es eine Hilfsvorrichtung, die temporär angebracht wird. Diese zeigt den korrekten Sitz des Magneten an sowie eine gerade Ausrichtung des Helms, d.h. eine Ausrichtung nach der Frankfurter Horizontalen und nach der Bipupillarlinie. Zur Messung und Aufzeichnung wird sie wieder abgenommen. Der Patient und die Umgebung, insbesondere der Stuhl, auf dem der Patient sitzt, sollten frei sein von magnetischen Metallteilen, da dies die Messung verfälschen würde. Nach jedem Gebrauch wird der Magnet wischdesinfiziert, nicht sterilisiert. Die maximale Mundöffnung wird gemessen, der Overbite addiert und in die Software beim entsprechenden Probanden eingetragen. Die in der Dissertation dargelegte Anwendung und Methodik bezüglich des Elektrognathographen sind der BioPAK-Software sowie Quelle [11] entlehnt.

Abbildung: JT-3D-Elektrognathograph und JVA-Messfühler



Abbildung 3: Richtige Platzierung des Messhelms und der Messfühler des JVA. Fakultativ kann JVA auch mit Bügel nach unten (siehe Abbildung) platziert werden, um Interferenzen zwischen Messhelm und Messfühler zu vermeiden (Bildquelle: UKSH Poliklinik für KFO, Koos et al.).

2.2.1.3 Durchführung der Messung

JVA und der Messhelm sind justiert. Dem Patienten wird die Anweisung gegeben, gerade und in aufrechter Haltung zu sitzen, geradeaus zu blicken, den Kopf nicht zu bewegen und beide Beine fest auf den Boden zu stellen. Er wird instruiert, den Mund maximal zu öffnen und so zu schließen, dass während der Schlussphase ein hörbarer Zahnkontakt entsteht. Während des Schließens soll kurz Zahnkontakt in habitueller Okklusion gehalten werden. Dem Probanden wird ein Startzeichen gegeben. Er beginnt, den Mund maximal rhythmisch zu öffnen und zu schließen. Blickt der Proband auf den Bildschirm, ermöglicht ihm die Software durch ein geräuschgebendes Metronom und eine Animation, den angestrebten 1,5-Sekunden-Zyklus bei den Mundöffnungs- und Mundschlussphasen einzuhalten, um eine gleichmäßige Unterkiefergeschwindigkeit einzuhalten. Eine Aufnahme ermöglicht die Detektion von Vibrationen über zehn Sekunden. Sind zehn Sekunden zu Ende, wird die Aufnahme gestoppt und gespeichert. So ergeben sich sechs bis sieben

Kieferbewegungen innerhalb eines Aufnahmezyklus. Während der Aufnahme wird geprüft, ob die Messfühler des JVA-Headsets nicht mit dem Messhelm interferieren. Ansonsten käme es zur Verstärkung der Vibrationen. Verfälschte Daten wären die Folge. Zudem wird die Kopfhaltung und rhythmische Ausführung der Mundöffnung, sowie der richtige Sitz des Helms und der Messfühler auf dem Kopf des Probanden fortwährend kontrolliert. Die jeweils erste Aufzeichnung diene dem Probanden lediglich zu Übungszwecken und dem Kennenlernen des Ablaufs. Dieser erste Durchlauf wurde bei der Auswertung der Daten daher nicht berücksichtigt, sondern sofort verworfen.

2.2.2 Fehlerquellen in der Messung

Justierung des JVA

Die Kabel der Messfühler müssen in die richtigen Ausgänge des Verstärkers eingestöpselt werden. Andernfalls findet keine Aufzeichnung statt. Ein Vertauschen der Kabel der Messfühler führt zur Vertauschung des rechten und linken Kiefergelenks in der graphischen Darstellung. Vor der Aufzeichnung ist eine Prüfung, ob die Kabel der Messfühler korrekt eingesteckt sind, obligat.

Die Messfühler müssen korrekt auf dem Kiefergelenk positioniert sein. Bei Verrutschen der Messfühler auf ein Areal außerhalb des Kiefergelenks werden die Daten verfälscht, da ein eventuell vorhandenes Geräusch nicht detektiert wird.

Der Proband selbst

Eine eingehende Instruktion für den Probanden muss vorher erfolgen. Er selbst braucht für die korrekte Ausführung der Mundschluss und -Öffnungsbewegungen koordinatives Geschick. Wird die Bewegung nicht synchron mit dem Metronom der Software ausgeführt, sind die Werte nicht miteinander vergleichbar, da Unterkiefergeschwindigkeiten differieren. Innerhalb der Mundöffnungs- und Mundschlussphasen muss der maximalen Mundöffnung Zahnkontakt in habitueller Okklusion folgen. Ermüdungserscheinungen der Muskulatur und Unkonzentriertheit können die Folge sein.

Justierung des Elektrognathographen

Die korrekte Justierung des Messhelms ist obligat. Sitzt dieser schräg oder verrutscht, ist die Darstellung der Unterkieferbewegung im Raum verfälscht. Bei Bewegung des Unterkiefers außerhalb des Sensorbereichs findet keine Aufzeichnung statt. Der korrekte Sitz des Helms ist mit der mitgelieferten Hilfsvorrichtung zu prüfen. Zudem kann der Messhelm individuell auf die Kopfform des Patienten eingestellt werden. Er sollte so fest angelegt werden, dass ein Verrutschen nicht mehr möglich, und gleichzeitig ein komfortabler Sitz gewährleistet ist. Ständige Blickkontrolle durch eine Person während der Aufzeichnung gewährleistet, dass kein Verrutschen des Helms stattgefunden hat. Andernfalls wird die Aufnahme gelöscht und neu aufgezeichnet [11].

Justierung des Magneten

Die Unterkieferbewegungen können mit Hilfe eines durch den Elektrognathographen erzeugten Magnetfeldes registriert werden. Hierfür muss der Magnet so positioniert werden, dass er nicht die Okklusion stört. Hat der Proband einen Tiefbiss, muss der Magnet teils an den Unterkieferinzisiven, teils an der Gingiva befestigt werden. Bei einem zu starken Tiefbiss ist die Befestigung, wenn diese nur an der Gingiva zu realisieren wäre, nicht mehr möglich. Desweiteren muss er parallel zur Bipupillarlinie angebracht werden. Eine Kerbe am Magneten hilft die richtige Position (diese weist auf die linke Seite des Patienten) zu finden [11].

Kontakt zwischen JVA und JT-3D während der Aufnahme

Während der Messung ist darauf zu achten, dass das JVA nicht mit dem Messhelm interferiert. Der auf dem Kopf gelegene Metallbügel oder sogar die Messfühler des JVA selbst können bei der Mundöffnungsphase des Probanden verrutschen und am Elektrognathographen anstoßen. Dies führt zu einer zusätzlichen Vibration, die falsch positive Messwerte mit sich bringt, da diese zusätzlich erzeugten Vibrationen in der graphischen Darstellung als Geräusche der Kiefergelenke gedeutet werden könnten. Hierzu war es während der Messung notwendig, dass während der gesamten Aufzeichnung eine Person durch Blickkontrolle kontrolliert, ob Berührungen zwischen JVA und dem Messhelm stattgefunden haben. Wurde dies bemerkt, wurde die Aufnahme

abgebrochen und gelöscht. Eine neue wurde stattdessen aufgezeichnet. Die Software selbst verfügt über eine Funktion, die sehr starke Interferenzen detektieren kann. Die sogenannte „Limited vibrations“ sind in der Software gekennzeichnet mit einer vertikalen, weißen und dicken Linie. Diese tauchen auf, wenn das aufgenommene Geräusch lauter ist, als BioPAK verarbeiten/messen kann und folglich nicht vom Kiefergelenk stammt.

Ventilatoren, Elektrisches Rauschen

Ventilatoren und elektrisches Rauschen können zusätzliche Vibrationen auslösen oder die Aufnahme beeinflussen. Während der Aufnahme dürfen Ventilatoren im Raum nicht laufen [158].

Magnetische/metallische Gegenstände

Magnetische Gegenstände oder Metallgegenstände in der Nähe des durch den Messhelm erzeugten Magnetfelds können zu Fehlern in der Aufzeichnung und zur Verfälschung der Daten führen. Laut Herstellerangaben dürfen sich keine magnetischen Gegenstände in der Nähe des Probanden befinden, das heißt, der Stuhl, auf dem der Proband sitzt, oder sogar der gesamte Raum, in dem die Aufzeichnung stattgefunden hat, muss frei von magnetischen Gegenständen sein. Ebenso führen metallische Gegenstände am Stuhl selbst oder am Probanden (Piercings) zu einer Störung des durch den Elektrognathographen erzeugten Magnetfeldes. Es ist darauf zu achten, dass Piercings vor der Messung abgenommen werden sowie magnetische Gegenstände vor der Aufzeichnung aus dem Raum entfernt werden [11].

2.2.3 Graphische Darstellung der Vibrationen innerhalb der Software

Wurden Kiefergelenkgeräusche beziehungsweise Vibrationen mittels Messfühler im Record-Mode der Software aufgenommen, können diese im sogenannten Review-Mode der Software graphisch dargestellt werden.

Abbildung: Graphische Darstellung der Vibrationen bei Mundöffnungs- und Mundschlussbewegungen im Review-Mode

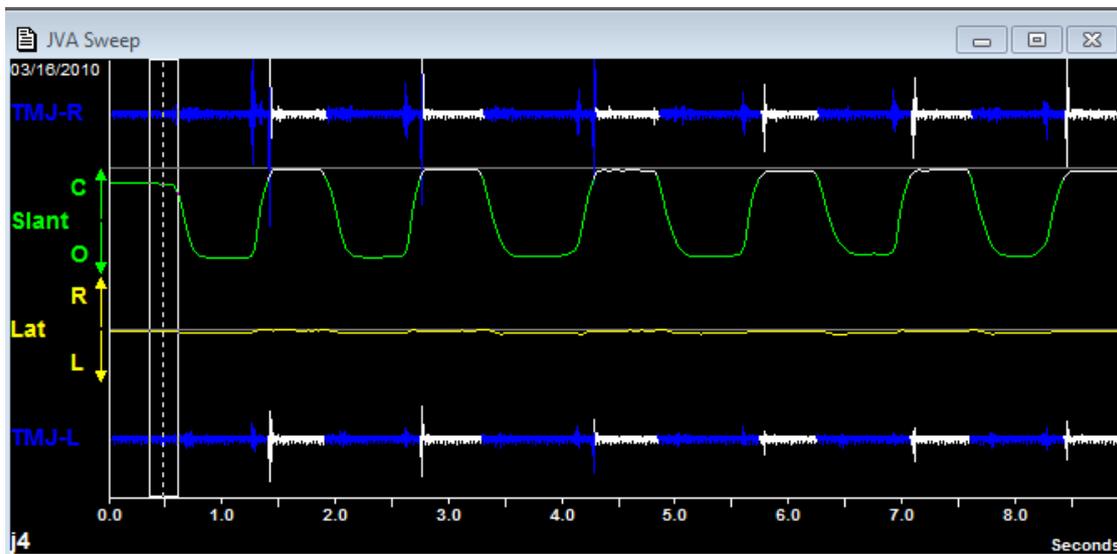


Abbildung 4: Screenshot der graphischen Darstellung der Vibrationen eines Probanden im Review Mode

- Die etwa als Sinuskurve imponierende grüne Linie zeigt die maximal Mundöffnung (O) und Mundschluss unter Zahnkontakt (weiße horizontale Linien) (auf Ebene des grünen „C“s).
- Die alternierend blau-weißen Linien darüber und darunter symbolisieren emittierte Vibrationen des rechten (TMJ-R) und linken (TMJ-L) Kiefergelenks, dargestellt als Amplitude gegen die Zeit in Sekunden. Die weißen Abschnitte spiegeln Zahnkontakte wieder.
- „Lat“ (in gelb, Mitte links) zeigt die seitliche Abweichung des Kiefers bei maximaler Mundöffnung nach rechts (R) und nach links (L). Es kennzeichnet also die Deviation/Deflektion.

Die Software zeichnet die emittierten Vibrationen zeitgenau mit der Ausführung der Kieferbewegungen der Probanden als Amplitude gegen die Zeit auf (blaue Linien in Abbildung 4). Die Software selbst ermöglicht eine Markierung der signifikanten Vibrationen mit der höchsten Amplitude. Innerhalb dieser Ansicht (Abbildung 4) kann aber auch jede beliebige Vibration markiert werden, indem der Cursor (vertikaler weißer Balken links) über die entsprechende Vibration bewegt wird. Die markierten Vibrationen werden sodann als Zahlenwerte verschiedener frequenz-, integral- und amplitudenassoziierter Items wiedergegeben (Abbildung 5 unten, grau hinterlegt).

Abbildung: Markierte Vibrationen mit entsprechenden Zahlenwerten der Items

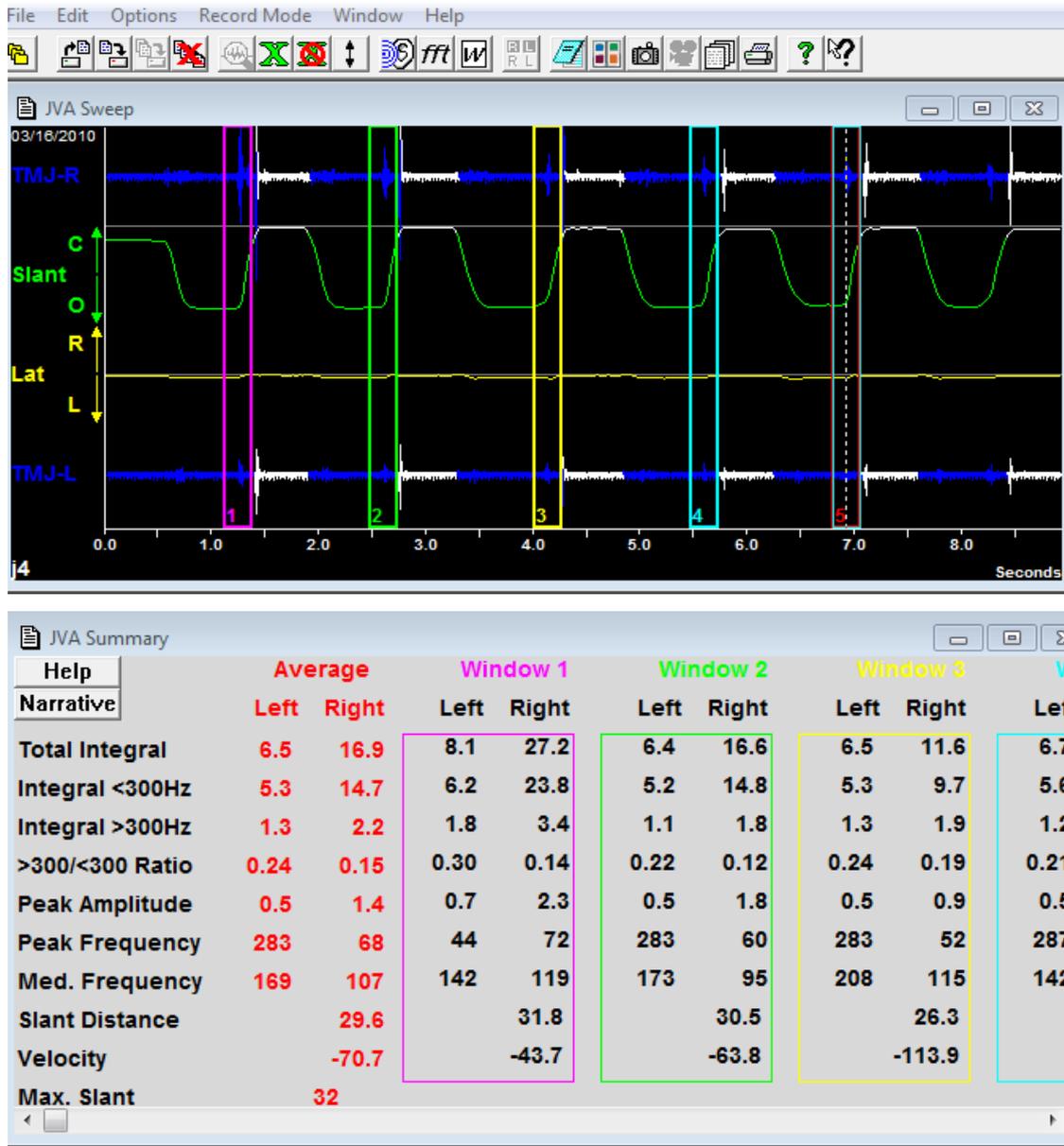


Abbildung 5: Screenshots markierter Vibrationen mit entsprechenden Zahlenwerten verschiedener Items (Messgrößen)

Oben: Durch Bewegen des Cursors über einen Ausschnitt der graphischen Darstellung und Klicken des grünen „X“ in der oberen Legende werden Vibrationen markiert. Für jede markierte Vibration im entsprechenden Intervall erscheinen farblich verschiedene vertikale Balken, sogenannte „windows“.

Unten: Die oben markierten Vibrationen werden sodann als Zahlenwerte verschiedener frequenz-, integral- und amplitudenassoziierter Items entsprechend der Farbgebung der „windows“ der oberen Abbildung farblich umrahmt dargestellt.

Durch die Fast-Fourier-Transformation (Klicken von „fft“, siehe Abbildung 5 obere Legende) wird für jede Vibration getrennt für das rechte und linke Kiefergelenk das Frequenz-Spektrum extrahiert. Aus diesem Frequenzspektrum lassen sich die in der Dissertation zur Auswertung herangezogenen Items nachvollziehen und interpretieren. Die Bedeutung und klinische Interpretation der Items wird in Kapitel 2.2.5 dargelegt.

Abbildung: Frequenzspektrum der Vibrationen

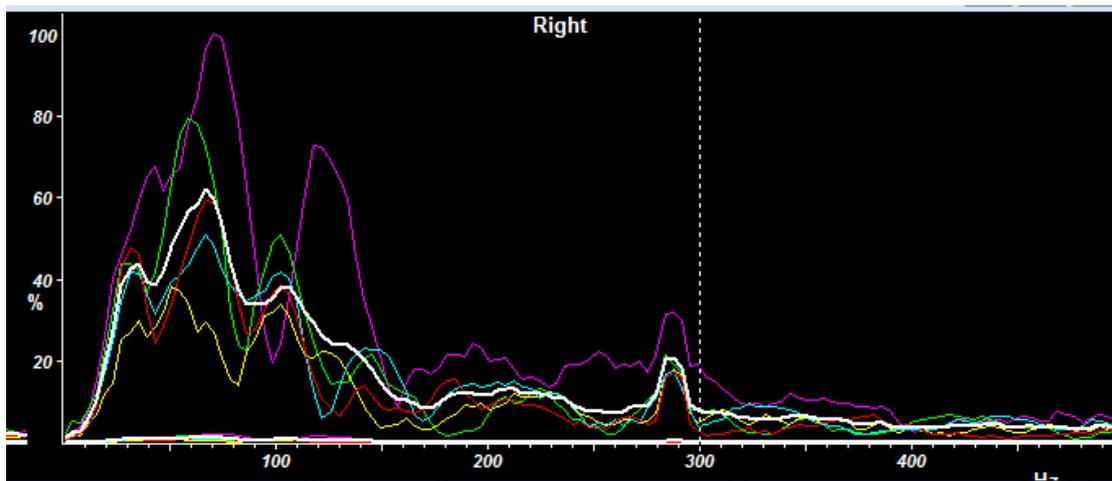


Abbildung 6: Screenshot des Frequenzspektrums markierter Vibrationen eines rechten Kiefergelenks. Das Schaubild zeigt die Energie (in Pa, Amplitude, vertikale Achse) in Abhängigkeit von der Frequenz (in Hz, horizontale Achse) der markierten Vibrationen [51] (aus Abbildung 5). Die farbliche Codierung im Frequenzspektrum widerspiegelt die Farbcodierung der sogenannten „windows“ sowie der eingerahmten Zahlenwerte entsprechender Items.

Das Frequenzspektrum einer Vibration gibt zudem die typische Wellenform einer Vibration (Frequenzmuster) an. Daraus lassen sich spezifische Zustände der Kiefergelenke ermitteln, wie Entzündung, Discusbewegung, Discusverlagerung mit Reposition, Discusverlagerung ohne Reposition, sowie degenerative Gelenkerkrankungen [105]. Die Interpretation der Wellenform war nicht Gegenstand vorliegender Dissertation.

Das zeitliche Auftreten der Vibrationen (Mundöffnung oder Mundschluss jeweils entweder initial, intermediär oder terminal) wird im X-Y View graphisch dargestellt.

Abbildung: Zeitliches Auftreten markierter Vibrationen

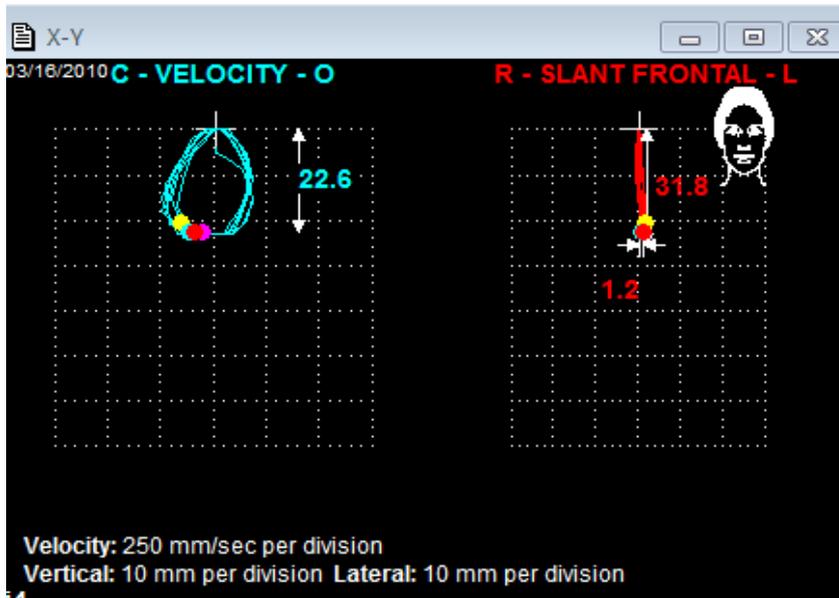


Abbildung 7: Screenshot des zeitlichen Auftretens der Vibrationen als graphische Darstellung. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Vibrationen bei initialem Mundschluss markiert wurden. Die Farbcodierung entspricht den markierten windows und eingerahmten Zahlenwerten entsprechender Items (siehe Abbildung 5).

2.2.4 Bestimmung der Kiefergelenkgeräusche/Vibrationen innerhalb der Software im Rahmen der Dissertation

In vorliegender Dissertation wurden nicht diese durch die Software vorgeschlagenen, signifikantesten Vibrationen herangezogen, sondern es wurden willkürlich „vibrationsärmere“ Intervalle bei Artikulation der Kiefergelenke markiert. Hierfür wurden pro Proband bei den jeweils gespeicherten Messwiederholungen gezielt mindestens fünf „windows“ innerhalb der graphischen Darstellung in der Software gesetzt, um diese Vibrationen als Werte der amplituden-, integral- und frequenzassoziierten Items zu erhalten.

Abbildung: Markierte, nicht signifikante Vibrationen

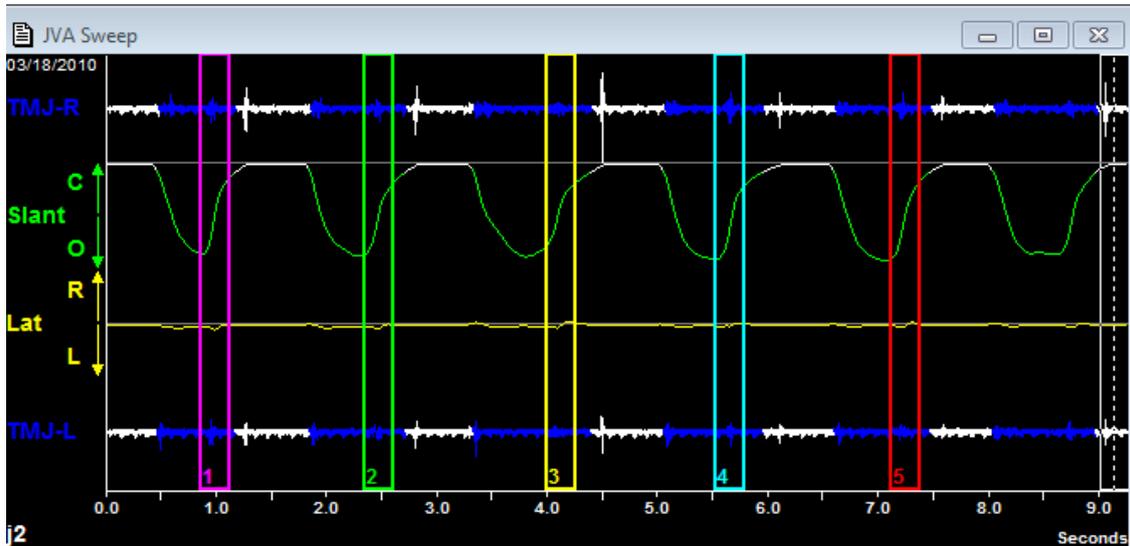


Abbildung 8: Screenshot der exemplarischen Vorgehensweise, Vibrationen zu markieren.

Voraussetzungen zum Einschluss in die statistische Auswertung der Gruppe der Non-JIA-Probanden:

- Vier Messwiederholungen, dabei vier zu markierende, nicht signifikante Vibrationen innerhalb einer Messung
- Bei 31 eingeschlossenen Probanden (N=31) ergibt dies 496 Werte **je Item** („Counts“) in der Statistik, entsprechend einer Grundgesamtheit von n=6944 Datensätzen bei 7 untersuchten Items, jeweils für das linke und rechte KG

Gruppe JIA-Probanden:

- Eine Messung, dabei vier zu markierende, nicht signifikante Vibrationen innerhalb dieser Messung
- bei 22 eingeschlossenen Probanden (N=22) ergibt dies 88 Werte je Item („Counts“) in der Statistik bei einer Grundgesamtheit von n=1232 Datensätzen

Beide Gruppen:

- Die Vibration wird zum gleichen Zeitpunkt abgegriffen
- Die Vibration darf nicht aus Zahnkontakten oder bei Bewegungsstillstand wie z.B. maximaler Mundöffnung bestimmt werden

2.2.5 Bedeutung der Items (Messgrößen)

Wie in diversen Studien aufgezeigt, lassen die untersuchten Items Rückschlüsse auf den Zustand des Kiefergelenks oder die Art der Dysfunktion zu [42, 49, 51, 56, 59, 126, 162]. Eine Erläuterung der statistisch untersuchten Items ist folgender Tabelle zu entnehmen:

Abbildung: Items mit Bedeutung

<p>Total integral (in PaHz)</p>	<p>Erklärung: Fläche unter der Frequenzverteilungskurve im Frequenzspektrum von 0-500Hz (Abbildung 6), Gesamtmenge/ Gesamtintensität der Energie in den Vibrationen [42, 171] Klinische Interpretation: Niedrige Werte sind bei gesunden KG, höhere Werte bei Dysfunktionen zu registrieren [69]</p>
<p>Integral<300Hz (in PaHz)</p>	<p>Erklärung: Fläche unter der Frequenzverteilungskurve im Frequenzspektrum von 0-300Hz; Energiesumme< 300 Hz [42, 171] Klinische Interpretation: Niedrigere Frequenzen (unter 300Hz) sind assoziiert mit Vibrationen ausgehend von Weichteilstrukturen, des Discus und/oder Knorpels. Frequenzen in diesem Bereich zeigen Discusverlagerungen mit Reposition, generalisierte Gelenkschlaffheit sowie Hypermobilität [42]</p>
<p>Integral>300Hz (in PaHz)</p>	<p>Erklärung: Fläche unter der Frequenzverteilungskurve von 301-500Hz; Summe der Energie über 300 Hz [42, 171] Klinische Interpretation: Höhere Frequenzen (über 300Hz) sind assoziiert mit degenerativen Gelenkveränderungen [42, 49, 51, 57, 164].</p>
<p>>300/<300Hz Ratio</p>	<p>Erklärung: Verhältnis von „Integral>300Hz“ zu „Integral<300Hz“ [171]</p>

	<p>Klinische Interpretation:</p> <p>Gibt Aufschluss über degenerative Zustände des Kiefergelenks. Je höher dieser Wert, desto weiter fortgeschritten ist der degenerative Zustand des Kiefergelenks [51, 66, 164].</p>
<p>Peak Amplitude (in N/m²)</p>	<p>Erklärung:</p> <p>Zeigt die höchste Schwingungsintensität der Vibration (auf der y-Achse im Frequenzspektrum) [42]</p> <p>Klinische Interpretation:</p> <p>Bei Werten größer als 6 N/m² wird das Geräusch für den Probanden selbst hörbar [162]</p>
<p>Peak Frequency (in Hz)</p>	<p>Erklärung:</p> <p>Die Frequenz, bei der die höchste Intensität der Vibration auftritt [171];</p> <p>Klinische Interpretation</p> <p>Ist assoziiert mit der Chronizität einer Gelenkstörung [42]; höhere Werte um 120Hz können milde Dysfunktionen anzeigen, gesunde Kiefergelenke zeigen Frequenzen um 35 Hz [69];</p>
<p>Median Frequency (in Hz)</p>	<p>Erklärung:</p> <p>Zentrale Tendenz der Kurve im Frequenzspektrum zwischen 0 und 500Hz; die Frequenz, bei welcher die Hälfte der Energie des Total Integrals darüber, die Hälfte darunter liegt [42, 171]</p> <p>Klinische Interpretation:</p> <p>Niedrigere Werte sind eher assoziiert mit Discus-Veränderungen, höhere Werte mit degenerativen Gelenkveränderungen [42]</p>

Tabelle 3: Durch die Software bestimmte Items mit Einheiten, Erklärungen und klinischen Interpretationen. Die Items „Slant Distance“, „Velocity“, „Max. Slant“, „Lateral Deflection“ wurden als zusätzliche Daten mittels Elektrognahtograph erhoben. In der statistischen Auswertung finden diese keine Berücksichtigung.

JVA selbst benutzt zur Diagnosestellung ein wissenschaftlich validiertes Flowchart, angelehnt an die Klassifikation pathologischer Kiefergelenkzustände nach Piper [23, 66, 70]. Das Flowchart ermöglicht eine Diagnosestellung anhand konkretisierter Werte der Items „Total Integral“, „>300/<300Hz Ratio“, „Integral>300Hz“ und der maximalen Mundöffnung. Die dargelegte assoziierte Wellenform der Vibrationen aus dem Frequenzspektrum unterstützt die Diagnosestellung.

Abbildung: Flowchart zur Diagnosefindung anhand der Werte der Items

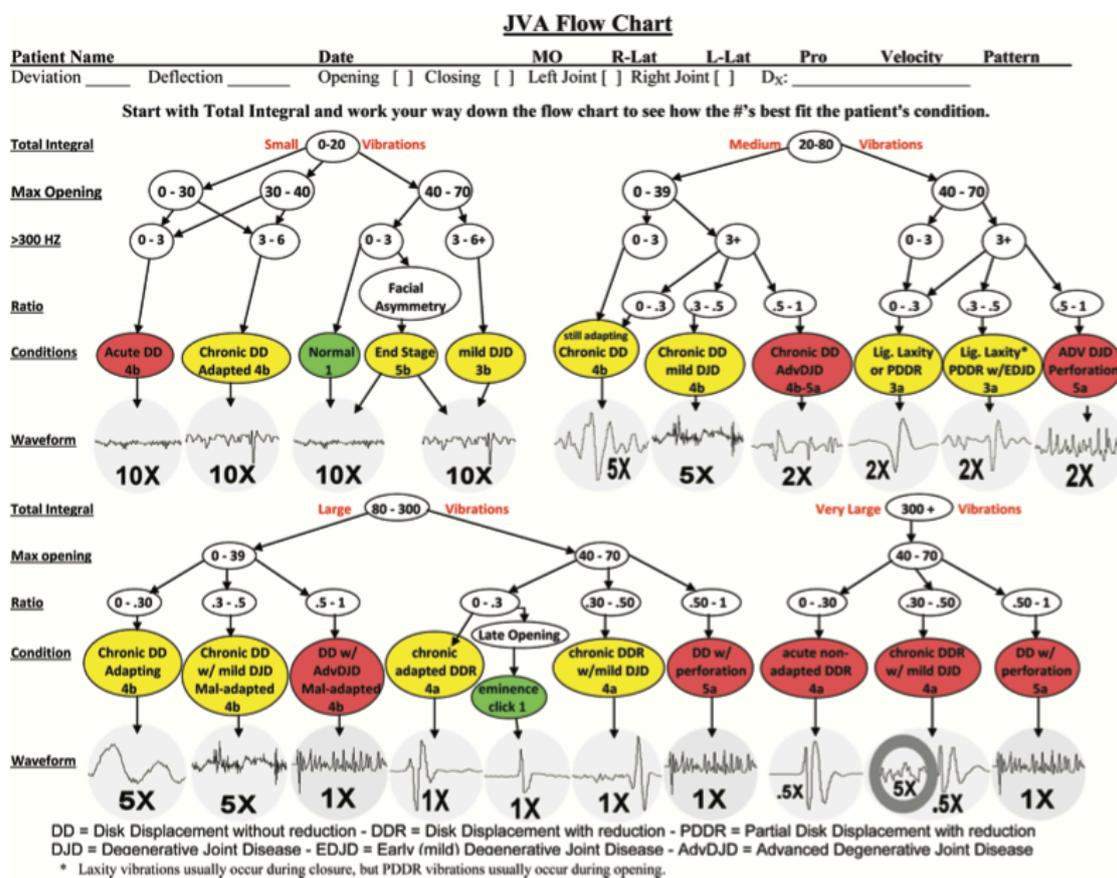


Abbildung 9: Das JVA-Flow-Chart lässt eine genaue Diagnose zu. Der Anwender gleicht die Werte des Probanden/Patienten mit dem Flowchart ab. Er beginnt mit dem Wert des Items „Total Integral“ des Patienten, um dann das Flow Chart mit maximaler Mundöffnung des Patienten abzugleichen, dann „>300 Hz“ sowie „>300/<300Hz ratio“ für eine Diagnose heranzuziehen. Flowchart entnommen aus Kerstein [66], Verwendung mit Genehmigung von IGI Global.

Klassifikation nach Piper [170] (mit Verweis auf [23])

1. Normales Kiefergelenk
2. Lockere Kapsel ohne Discusdislokation
- 3a. Partielle Discusdislocation mit Reposition
- 3b. Partielle Discusdislocation ohne Reposition
- 4a. Komplette Discusdislokation mit Reposition
- 4b. Komplette Discusdislocation ohne Reposition
- 5a. Discus disloziert, perforiert, adaptiert
- 5b. Discus disloziert, Knochen an Knochen, Endstadium

So sind dort beispielsweise normal artikulierende Kiefergelenke innerhalb eines Individuums charakterisiert durch 0-10 PaHz im Item „Total Integral“ in beiden Gelenken. Werden Mundöffnung, Deviation/Deflexion durch den Elektrogonatographen aufgenommen, dürfen diese Items nicht auffällig sein und es dürfen sonst keine gelenkbezogenen Beschwerden bestehen [66].

2.3 Statistische Auswertung

Die BioPAK-Software hat keine Funktion, die es erlaubt, die Daten in ein Tabellenformat zu exportieren. Diese wurden manuell in eine Excel-Tabelle übertragen. Aus dieser Excel-Tabelle wurden die Zahlenwerte bzw. Datensätze jener Probanden in eine JMP-Tabelle überführt, welche die Voraussetzungen zum Einschluss in die statistische Auswertung erfüllten (siehe 2.2.4). Kumulativ beinhaltet die JMP-Tabelle dementsprechend Datensätze respektive Vibrationswerte der JIA und Non-JIA-Probanden mit einer Grundgesamtheit von insgesamt $n=8176$, welche die Grundlage der statistischen Berechnungen innerhalb der Dissertation im Folgenden darstellt.

Die innerhalb der Statistik untersuchten Items mit entsprechenden Zahlenwerten jeweils für das rechte und linke Kiefergelenk waren:

- 1) Total integral, 2) Integral<300Hz, 3) Integral>300Hz, 4) >300Hz/<300Hz Ratio, 5) Peak Amplitude, 6) Peak Frequency, 7) Median Frequency.

2.3.1 Statistische Auswertung der Methodenprüfung

2.3.1.1 Überprüfung auf Normalverteilung: Schiefe und Kurtosis

Die Überprüfung der Verteilung der Daten zur Auswahl der weiteren statistischen Methoden erfolgte mittels der Formmaße Schiefe (Skewness) und Kurtosis (Curtosis) für jedes Item. Durch die in der Dissertation vorliegende graphische Darstellung (Histogramm mit darüber liegendem Boxplot) kann eine erste Einschätzung der Verteilung erfolgen.

Die Schiefe kennzeichnet die Symmetrie beziehungsweise Asymmetrie, die Kurtosis die Wölbung der Verteilung. Ist die Schiefe=0, ist die Verteilung symmetrisch und normalverteilt, bei einer Schiefe>0 ist die Verteilung linksgipflig, bei einer Schiefe<0 ist die Verteilung rechtsgipflig. Ist die Kurtosis >0, ist die Verteilung schmaler als die Normalverteilungskurve, was ein größeres Maximum zur Folge hat, bei einer Kurtosis<0 ist ein kleineres Maximum zu erwarten [160]. Bei Werten zwischen -1 und +1 für jeweils Schiefe und Kurtosis „darf Normalverteilung angenommen werden“ [91].

2.3.1.2 Bestimmung der Messvariabilität mittels Variationskoeffizient

Im Rahmen der Methodenprüfung wurde durch Bestimmung des Variationskoeffizienten (CV, relative Standardabweichung) das Ausmaß der (Un)-Präzision der Messung quantifiziert [83]. „Der Variationskoeffizient misst (...) das Verhältnis von Standardabweichung und arithmetischem Mittel“ und „eignet sich (...) insbesondere zum Vergleich der Streuungen verschiedener Messreihen“ [43]. Hierfür wurde nur die Gruppe der gesunden Probanden einbezogen, da diese vier Messwiederholungen aufwiesen. Die Bewertung der Messvariabilität bei vier Messwiederholungen pro Proband mit jeweils vier markierten windows (Vibrationen) erfolgt hier durch den Vorschlag nach Barrentine [6].

Tabelle: Bewertung der Messvariabilität nach Barrentine [6]

Variationskoeffizient (CV)	Bewertung (englisch)	Bewertung (deutsch)
<10%	excellent	hervorragend
11% bis 20%	adequate	ausreichend
21% bis 30%	marginally acceptable	grenzwertig akzeptabel
>30%	unacceptable	inakzeptabel

Tabelle 4: Richtlinien für Messvariabilität als Vorschlag nach Barrentine 1991 [6]

2.3.1.3 Bestimmung der Reliabilität mittels Intraklassenkorrelationen

Der Intraklassenkorrelationskoeffizient (ICC) mit 95% Konfidenzintervall (CI) wird als Maß für die Reproduzierbarkeit der Einzelmessungen herangezogen. Der ICC ist ein Index zur Bestimmung der Reliabilität [72]. Die Bewertung des ICC findet nach den Richtlinien von Cicchetti et al. [18] statt.

Tabelle: Bewertung des ICC nach Cicchetti et al. [18]

ICC	Bewertung (englisch)	Bewertung (deutsch)
<0,4	poor	mangelhaft
0,4-0,59	fair	mittelmäßig
0,6-0,74	good	gut
0,75-1,00	excellent	ausgezeichnet

Tabelle 5: Richtlinien zur Bewertung des ICC nach Cicchetti et al. [18]

2.3.2 Statistische Auswertung der explorativen Untersuchung: Überprüfung der Werte auf Signifikanz zwischen JIA und Non-JIA

Außerdem wurde geprüft, ob signifikante Unterschiede der Messdaten *zwischen* den Gruppen (Probanden mit juveniler idiopathischer Arthritis=JIA, und gesunden Probanden=NON-JIA) bestehen. Als nicht-parametrischer Test wurde dafür der Mann-Whitney-U-gewählt. Zunächst wurden jeweils Quantilen

bestimmt (Minimum, 10%, 25%, der Median, 75%, 90%, Maximum), die mittels Box-and-Whisker-Plots veranschaulicht wurden, so dass eine erste Einschätzung der Unterscheidung zwischen den Gruppen mit diesem graphischen Hilfsmittel möglich war.

2.3.2.1 Mann-Whitney-U-Test

Mit dem nichtparametrischen Mann-Whitney-U-Test [89] wird überprüft, ob zwischen den Werten der JIA und Non-JIA-Probanden signifikante Unterschiede zu verzeichnen sind, indem zwei Mediane miteinander verglichen werden. Die Messwerte je Gruppe werden rangiert und es werden jeweils Rangzahlen zugeteilt, daraus Rangsummen gebildet und diese zur Berechnung einer Teststatistik (U) herangezogen [157, 160].

Abbildung: Formel zur Berechnung der Teststatistik U

$U_1 = n_1 n_2 + (n_1(n_1+1)) / 2 - R_1$ $U_2 = n_1 n_2 + (n_2(n_2+1)) / 2 - R_2$
U_1 = Teststatistik der Non-JIA-Probanden U_2 = Teststatistik der JIA-Probanden $R_{1/2}$ = Summe der Rangzahlen der Gruppen 1 und 2 n_1 = 31 (Anzahl der Non-JIA-Probanden), Gruppe 1 n_2 = 22 (Anzahl der JIA-Probanden), Gruppe 2

Abbildung 7: Formel zur Berechnung zur Teststatistik, entnommen aus [160].

Bei einer Gruppengröße von mindestens 10 Probanden [160] wie vorliegend, wird U (Teststatistik) Z-standardisiert, um diesen Wert mit dem kritischen Wert der Z-Verteilung (Standardnormalverteilung, aus Tabellen zu entnehmen) zu vergleichen. Ein signifikanter Unterschied (zwischen den Gruppen JIA/Non-JIA) liegt vor, wenn der Betrag der (Z-standardisierten) Teststatistik größer ist als der kritische Wert, das heißt, wenn $p < 0,05$ (Signifikanzniveau) [157].

Die Messdaten wurden mit JMP™, Version 14.0 SAS Institute Inc., Cary, USA (Mann-Whitney-U-Test, Schiefe und Kurtosis, CV) sowie IBM SPSS Version 25 (ICC) statistisch ausgewertet.

3. Ergebnisse

3.1 Überprüfung auf Normalverteilung mittels Schiefe und Kurtosis

Einbezogen wurden Daten der 31 gesunden Probanden (Non-JIA), da hier vier Messwiederholungen vorlagen, nicht aber bei den JIA-Probanden. Zur Beurteilung von Schiefe/Kurtosis (beziehungsweise auch der Messvariabilität) respektive der Datenverteilung der gesunden Probanden (N=31) wurden zunächst die Datensätze der gesunden Probanden (n=6944) aus der bestehenden JMP-Tabelle in eine neue JMP-Tabelle extrahiert, aus welcher zunächst die relative Standardabweichung (CV) der vier Messwiederholungen *je Item und je Proband* ersichtlich wird. Aus diesen Datensätzen mit einer Grundgesamtheit von n=434 (N=31, 7 Items je rechtes/linkes KG, demgemäß 14) wurden nun über *alle* Probanden *je Item* neben den Quantilen der Variationskoeffizienten (CV in %) auch Schiefe und Kurtosis errechnet. Zur ersten Einschätzung der Verteilung der Daten anhand graphischer Hilfsmittel wurden für die sieben Items jeweils für das rechte und Kiefergelenk 14 Histogramme mit darüber geordneten Boxplots erstellt. Die Histogramme zeigen demgemäß Balken, welche die Verteilung aller erhobenen Messdaten aus den vier Messzyklen je vier markierter Vibrationen aller 31 gesunden Probanden je Item in Bezug auf die Messvariabilität darstellen. Wie der JMP-Software zu entnehmen ist, zeigen die senkrechten Linien innerhalb der Box-and-Whisker-Plots jeweils die Mediane der Variationskoeffizienten, die senkrechten links und rechts davon liegenden Linien jeweils die 75. und 25. Perzentile. Die Differenz daraus bildet den Interquartilsabstand. Die Whiskers zeigen jeweils das Minimum und Maximum an. Die Klammer außerhalb des Boxplots zeigt den Abschnitt der Datenverteilung, bei welchem 50% der Werte am dichtesten beieinander liegen. Eine „gedachte, senkrechte Linie“ durch den Konfidenz-Diamanten zeigt den Mittelwert. Die Enden (Spitzen) des Diamanten

zeigen die unteren und oberen 95% des Mittelwerts. Auf die Mediane der Variationskoeffizienten wird in Kapitel 3.2 eingehend eingegangen.

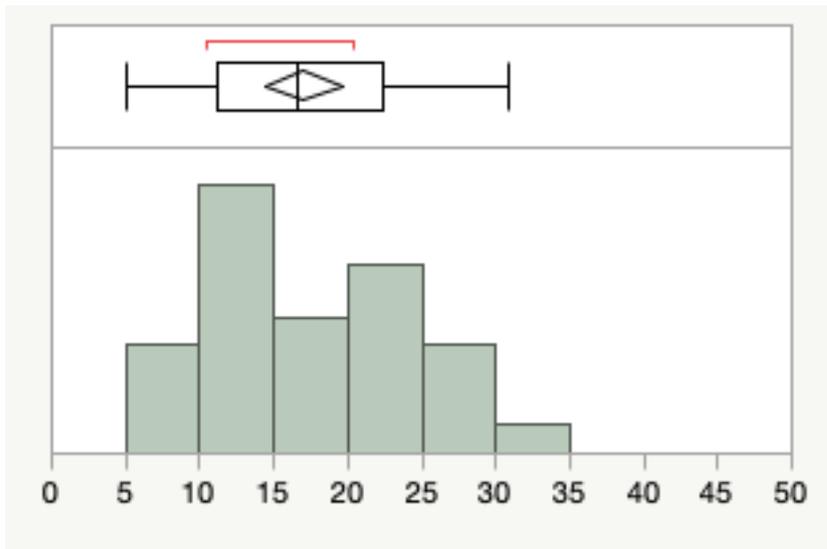
3.1.1 Übersicht der Verteilung der Daten; Schiefe und Kurtosis

Item	Skewness (Schiefe)	Kurtosis	Verteilung
Total Integral li	0,179	-0,986	Annähernd normalverteilt
Total Integral re	-0,309	-0,121	Annähernd normalverteilt
Integral < 300 Hz li	-0,307	-0,865	Annähernd normalverteilt
Integral < 300 Hz re	-0,036	-0,009	Annähernd normalverteilt
Integral > 300 Hz li	2,275	6,326	Nicht normalverteilt
Integral > 300 Hz re	1,235	1,106	Nicht normalverteilt
>300/<300 Hz Ratio li	3,934	18,045	Nicht normalverteilt
>300/<300 Hz Ratio re	0,658	-0,919	Annähernd normalverteilt
Peak Amplitude li	1,275	1,827	Nicht normalverteilt
Peak Amplitude re	1,145	0,888	Nicht normalverteilt
Peak Frequency li	0,684	0,289	Annähernd normalverteilt
Peak Frequency re	0,423	0,593	Annähernd normalverteilt
Med. Frequency li	1,069	0,912	Nicht normalverteilt
Med. Frequency re	0,589	-0,147	Annähernd normalverteilt

Tabelle 6: Zusammenfassung der Verteilung der Daten für alle Items. Die Verteilungen für die Items sind gemischt, sowohl annähernd normalverteilt, als auch nicht normalverteilt. Folglich sind nicht-parametrische Tests als weitere statistische Methoden zu wählen.

3.1.2 Statistische Darlegung der Verteilung der Daten und der Variationskoeffizienten (CV in %) für jedes Item

Verteilung und CV (Item: „Total Integral“ linkes KG)



Quantilen

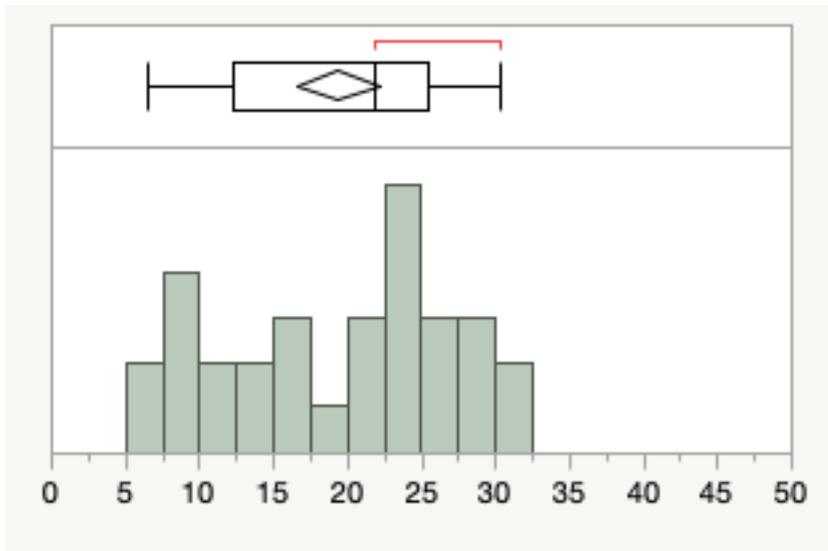
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
5,02	11,2	16,5	22,4	30,9

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
17,05	7,11	1,28	19,66	14,44	31	0,179	-0,986

Abbildung 10: Eine Schiefe von $0,179 > 0$ deutet auf eine leicht linksgipflige Verteilung hin, eine Kurtosis von $-0,986 < 0$ auf eine etwas flachere Form der Verteilung als die Kurve der Normalverteilung. Die Formmaße Schiefe und Kurtosis bewegen sich jeweils im Bereich zwischen -1 und +1. Für das Item „Total Integral“ für das linke Kniegelenk ist folglich annähernd Normalverteilung anzunehmen.

Verteilung und CV (Item: „Total Integral“ rechtes KG)



Quantilen

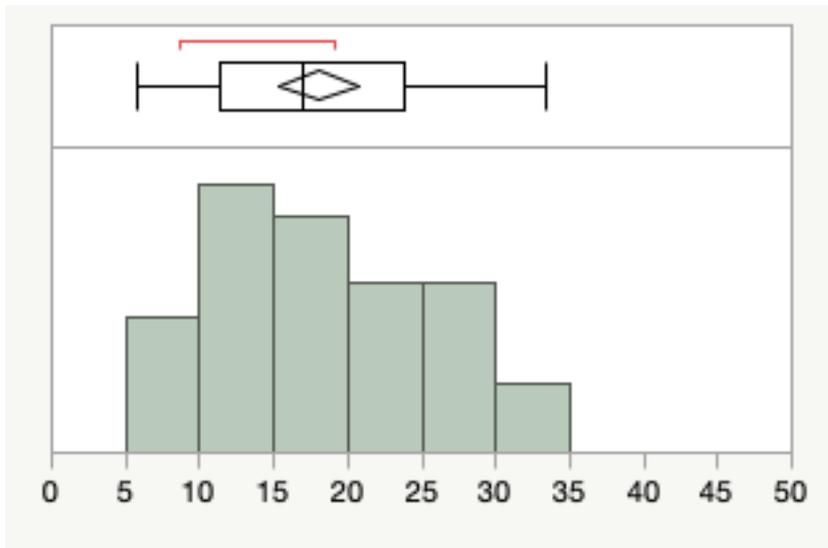
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
6,6	12,4	21,8	25,4	30,2

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
19,0	7,59	1,36	22,18	16,62	31	-0,309	-0,121

Abbildung 11: Die Schiefe von -0,309 zeigt eine leicht rechtsgipflige Verteilung, eine Kurtosis von $-0,121 < 0$ lässt auf eine etwas flacher verlaufende Kurve als die Normalverteilungskurve schließen. Die Formmaße Schiefe und Kurtosis bewegen sich jeweils im Bereich zwischen -1 und +1. Für das Item Total Integral des rechten Kiefergelenks ist demnach dennoch annähernd Normalverteilung anzunehmen.

Verteilung und CV (Item: „Integral<300Hz“ linkes KG)



Quantilen

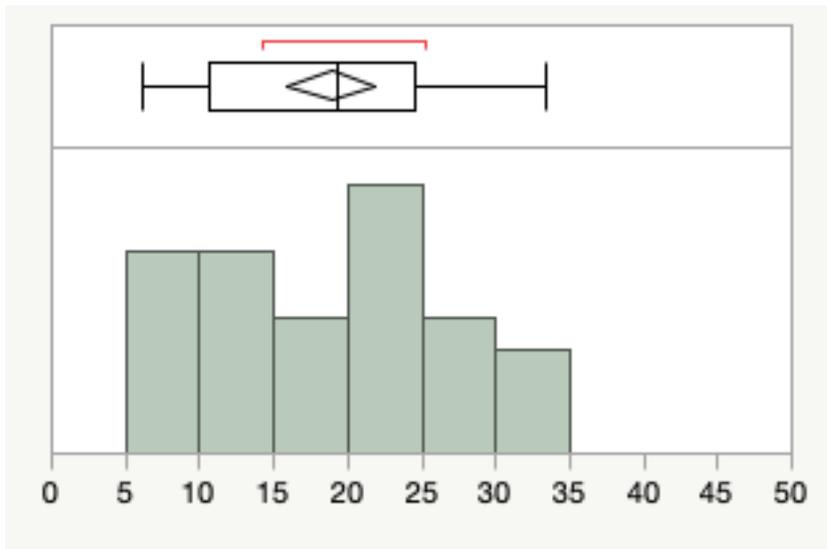
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
5,8	11,3	16,9	23,8	33,4

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
18,05	7,51	1,35	20,81	15,3	31	0,307	-0,865

Abbildung 12: Die Formmaße Schiefe und Kurtosis bewegen sich jeweils im Bereich zwischen -1 und +1. Für das Item Total Integral des rechten Kiefergelenks ist annähernd Normalverteilung anzunehmen. Eine Schiefe von $0,307 > 0$ deutet auf eine linksgipflige Verteilung hin, eine negative Wölbung auf eine flachere Verteilung als die Kurve der Normalverteilung.

Verteilung und CV (Item: „Integral<300Hz“ rechtes KG)



Quantilen

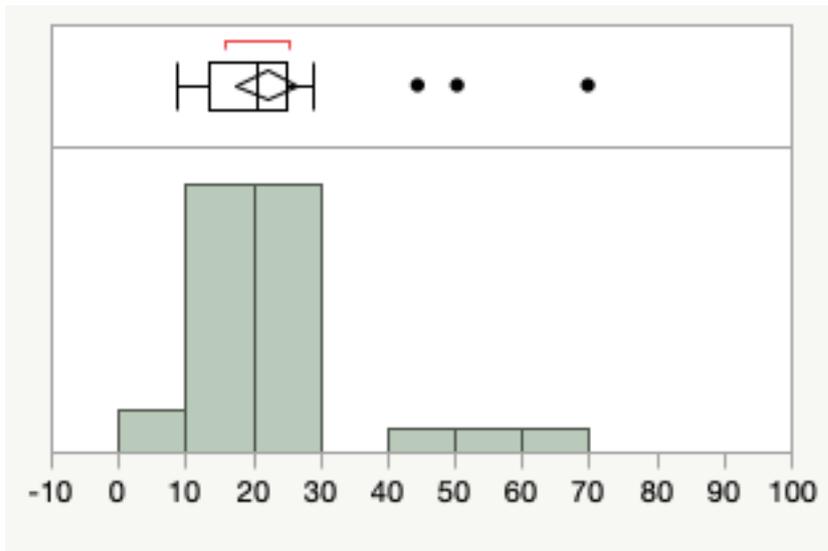
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
6,1	10,6	19,4	24,5	33,3

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
18,89	7,97	1,43	21,81	15,97	31	0,036	-0,998

Abbildung 13: Die Formmaße Schiefe und Kurtosis bewegen sich jeweils in Bereich zwischen -1 und +1. Für das Item „Total Integral“ des rechten Kiefergelenks ist annähernd Normalverteilung anzunehmen. Die Schiefe mit $0,036 > 0$ deutet auf eine linksgipflige Verteilung hin, eine negative Wölbung von $-0,998 < 0$ auf feine lachere Kurve als die der Normalverteilung.

Verteilung und CV (Item: „Integral>300Hz“ linkes KG)



Quantilen

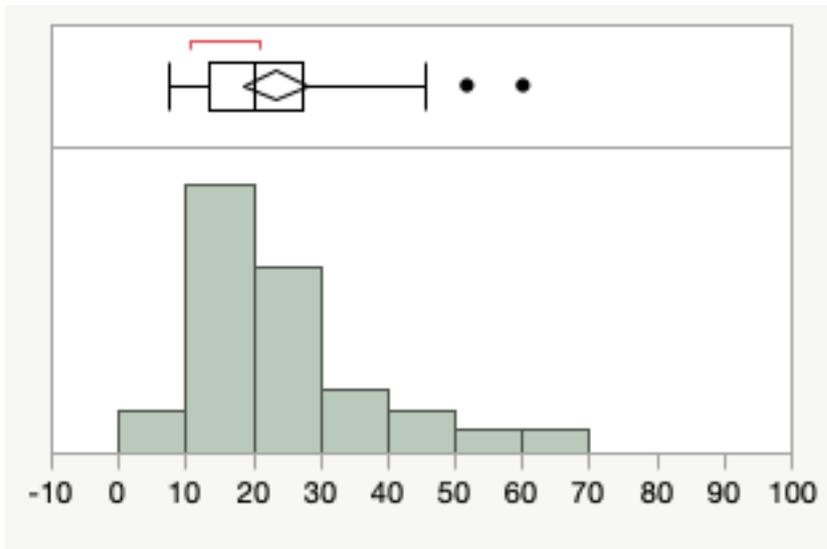
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
8,9	13,4	20,5	25,0	69,9

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
21,99	12,77	2,3	26,7	17,31	31	2,275	6,326

Abbildung 14: Die Werte für die Schiefe von 2,275 und die Kurtosis von 6,326 sind jeweils >1, daher ist die Verteilung deutlich linksgipflig sowie schmäler als die Normalverteilungskurve wäre. Die Formmaße Schiefe und Kurtosis deuten folglich auf nicht normalverteilte Daten für das Item „Integral > 300Hz“ des linken Kiefergelenks hin.

Verteilung und CV (Item: „Integral>300Hz“ rechtes KG)



Quantilen

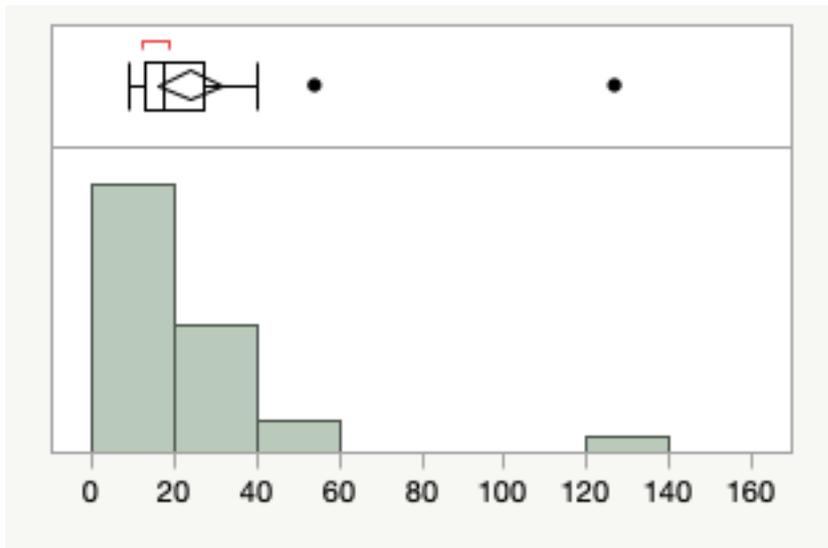
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
7,5	13,3	20,0	27,1	60,2

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
23,31	13,11	2,36	28,12	18,50	31	1,235	1,106

Abbildung 15: Die Werte für die Schiefe von 1,235 und die Kurtosis von 1,106 sind jeweils >1, daher ist die Verteilung linksgipflig beziehungsweise die Kurve verläuft schmaler als die der Normalverteilungskurve. Die Formmaße Schiefe und Kurtosis deuten folglich auf nicht normalverteilte Daten für das Item „Integral > 300Hz“ des rechten Kiefergelenks hin.

Verteilung und CV (Item: „Integral>300/<300 Ratio“ linkes KG)



Quantilen

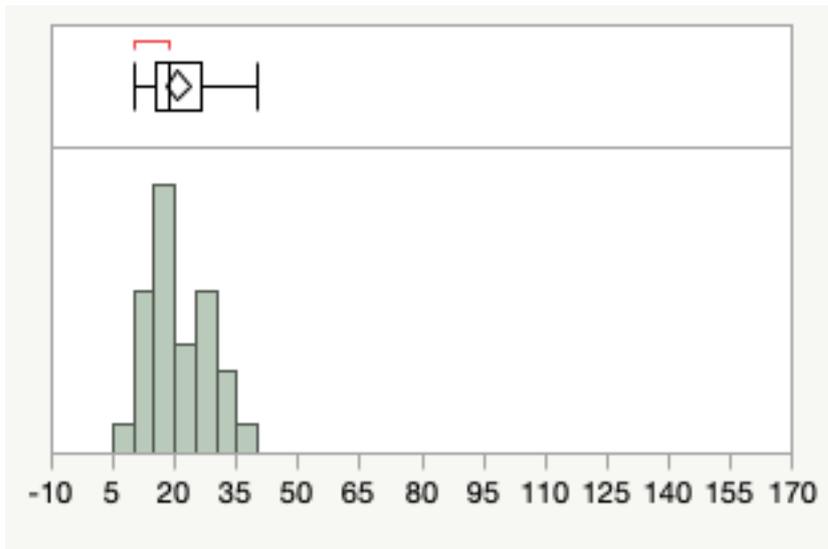
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
9,1	12,6	17,4	26,8	127,2

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
23,96	21,62	3,88	31,88	16,02	31	3,934	18,045

Abbildung 16: Die Werte für die Schiefe von 3,934 und die Kurtosis von 18,045 sind jeweils >1, daher ist die Verteilung der Daten deutlich linksgipflig sowie schmäler als die Normalverteilungskurve wäre. Die Formmaße Schiefe und Kurtosis deuten folglich auf nicht normalverteilte Daten für das Item „integral >300/<300 Ratio“ des linken Kniegelenks hin.

Verteilung und CV (Item: „Integral>300/<300 Ratio“ rechtes KG)



Quantilen

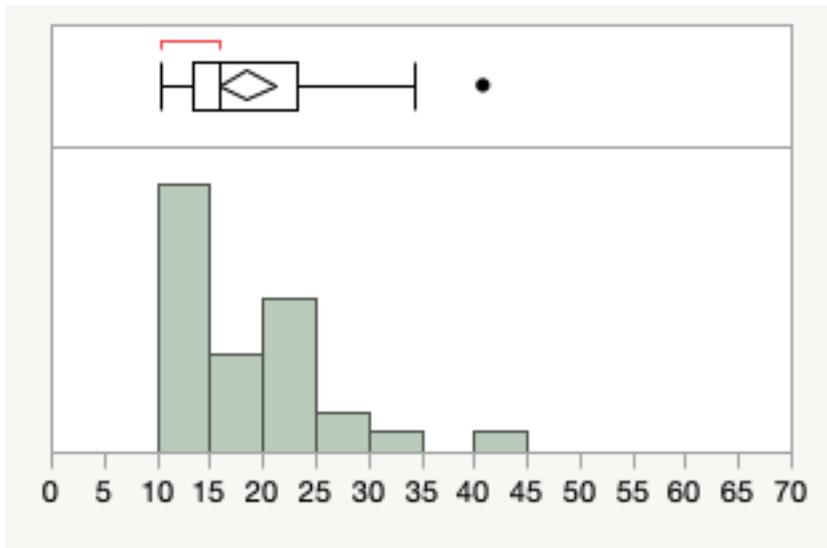
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
9,9	15,0	18,4	26,1	39,8

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
20,74	7,56	1,36	23,52	17,97	31	0,658	-0,919

Abbildung 17: Da der Wert für die Schiefe von $0,658 > 0$ ist die Verteilung linksgipflig, eine Wölbung von $-0,919$ hat eine flachere Verteilung als die Normalverteilungskurve zur Folge. Die Formmaße Schiefe und Kurtosis bewegen sich jeweils im Bereich zwischen -1 und $+1$. Für das Item Total Integral des rechten Kiefergelenks ist daher dennoch annähernd Normalverteilung anzunehmen.

Verteilung und CV (Item: „Peak Amplitude“ linkes KG)



Quantilen

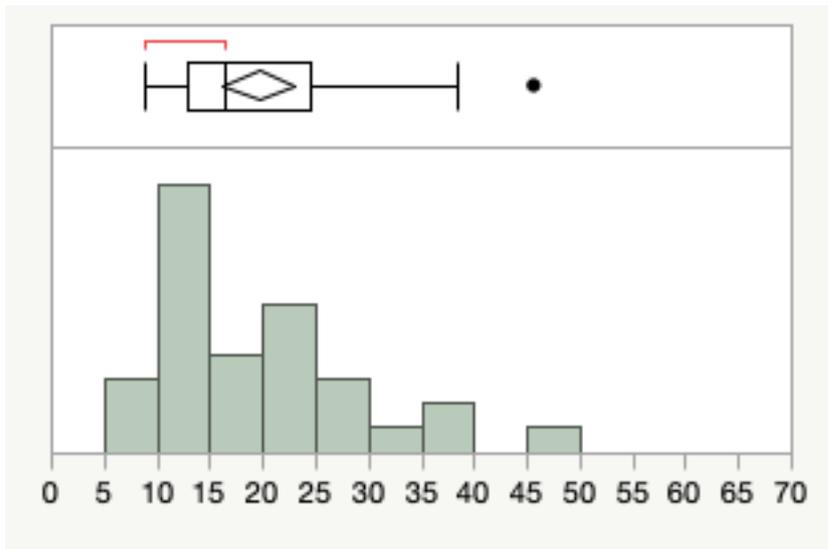
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
10,3	13,4	16,0	23,3	40,9

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
18,57	7,23	1,3	21,22	15,91	31	1,275	1,827

Abbildung 18: Die Schiefe mit Werten von 1,275 und die Kurtosis von 1,827 sind jeweils >1, daher ist die Verteilung linksgipflig sowie schmäler als die Normalverteilungskurve wäre. Die Formmaße Schiefe und Kurtosis deuten folglich auf eher nicht normalverteilte Daten für das Item „integral >300/<300 Ratio“ des linken Kniegelenks hin.

Verteilung und CV (Item: „Peak Amplitude“ rechtes KG)



Quantilen

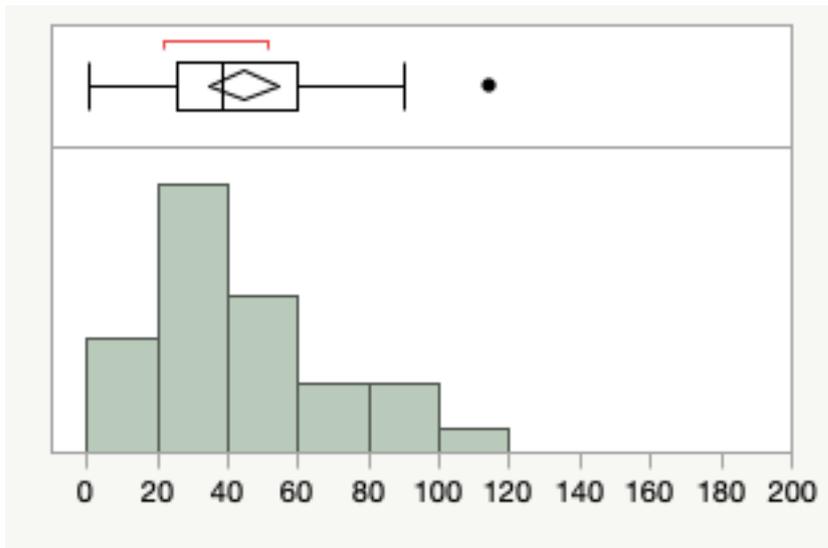
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
8,8	12,8	16,4	24,6	45,7

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
19,7	9,32	1,67	23,12	16,28	31	1,145	0,888

Abbildung 19: Die Schiefe von $1,145 > 0$ deutet auf eine linksgipflige Verteilung hin. Die Kurtosis von $0,888 > 0$ deutet auf eine steilgipfligere Verteilung hin als die der Normalverteilung. Da die Schiefe mit $1,145 > 1$, ist keine Normalverteilung mehr anzunehmen.

Verteilung und CV (Item: „Peak Frequency“ linkes KG)



Quantilen

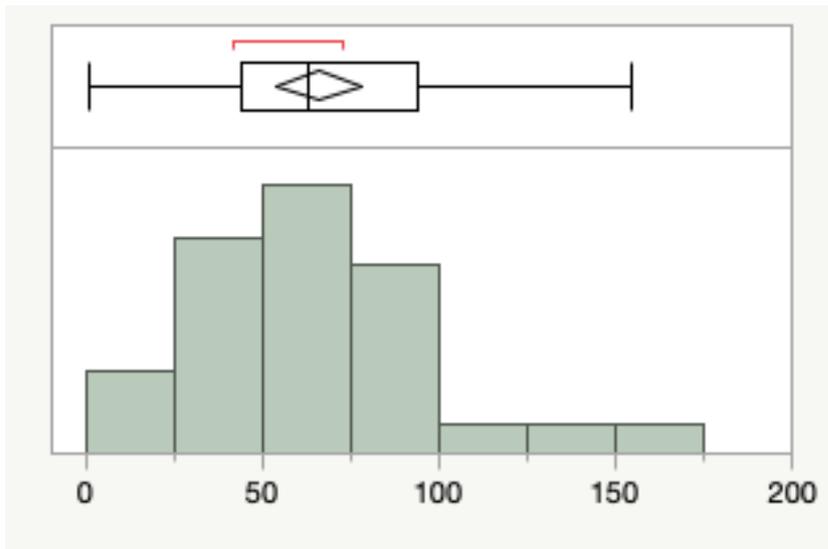
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
0,7	25,4	38,7	59,6	114,36

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
44,3	26,71	4,8	54,09	34,5	31	0,684	0,289

Abbildung 20: Der Wert für eine Schiefe von $0,648 > 0$ deutet auf eine linksgipflige Verteilung, die Kurtosis von $0,289 > 0$ auf eine schmalere und steilgipfligere Verteilung als die Normalverteilung hin. Die Formmaße Schiefe und Kurtosis bewegen sich dennoch jeweils im Bereich zwischen -1 und +1. Für das Item „Peak Frequency“ des linken Kiefergelenks ist annähernd Normalverteilung anzunehmen.

Verteilung und CV (Item: „Peak Frequency“ rechtes KG)



Quantilen

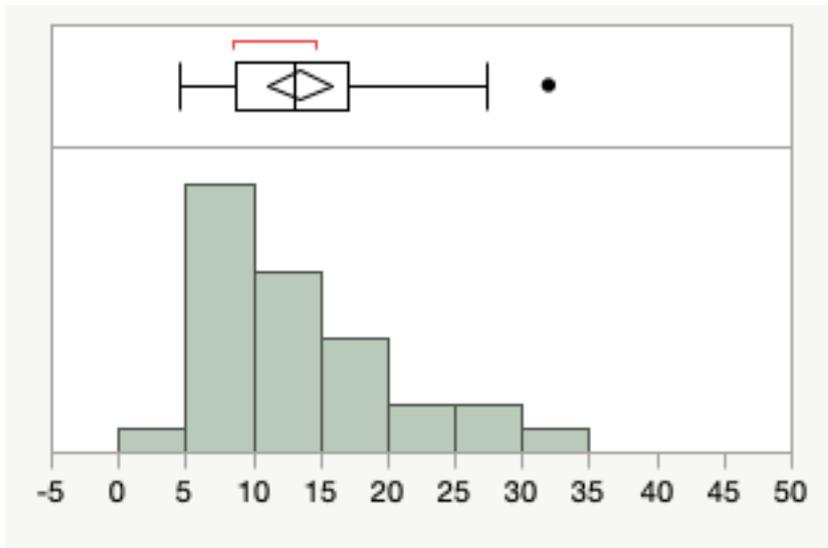
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
0,9	44,1	63,0	93,5	154,4

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
65,74	33,39	5,996	77,99	53,5	31	0,423	0,593

Abbildung 21: Die Schiefe von $0,423 > 0$ deutet auf eine linksgipflige Verteilung, die Kurtosis von $0,593 > 0$ auf eine schmalere und steilgipfligere Verteilung als die Normalverteilung hin. Die Formmaße Schiefe und Kurtosis bewegen sich dennoch jeweils im Bereich zwischen -1 und $+1$. Für das Item „Peak Frequency“ des linken Kiefergelenks ist folglich annähernd Normalverteilung anzunehmen.

Verteilung und CV (Item: „Med. Frequency“ linkes KG)



Quantilen

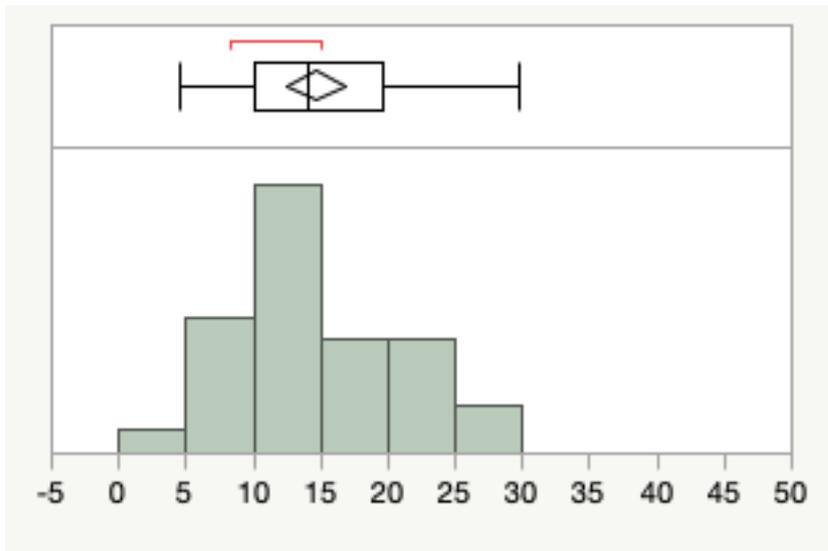
Minimum	25%	Median	75%	Maximum
4,6	8,7	13,0	17	32

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
13,48	6,7	1,2	15,93	11,03	31	1,069	0,912

Abbildung 22: Die Schiefe von $1,069 > 0$ deutet auf eine linksgipflige Verteilung, die Kurtosis von $0,912 > 0$ auf eine schmalere und steilgipfligere Verteilung als die Normalverteilung. Da der Wert für die Schiefe von $1,069 > 1$, ist nicht mehr Normalverteilung für Daten im Item „Med Frequency“ des linken Kiefergelenks anzunehmen.

Verteilung und CV (Item: „Med. Frequency“ rechtes KG)



Quantilen

Minimum	25%	Median	75%	Maximum
4,6	10,0	14,0	19,7	29,7

Summary Statistics

Mean	Std Dev	Std Err Mean	Upper 95% Mean	Lower 95% Mean	N	Skewness	Kurtosis
14,62	6,08	1,09	16,85	12,39	31	0,589	-0,147

Abbildung 23: Die Schiefe von $0,589 > 0$ deutet auf eine linksgipflige Verteilung, die Kurtosis von $0,593 > 0$ auf eine schmalere und steilgipfligere Verteilung als die Normalverteilung. Die Formmaße Schiefe und Kurtosis bewegen sich dennoch jeweils im Bereich zwischen -1 und $+1$. Für das Item „Med Frequency“ des rechten Kiefergelenks ist annähernd Normalverteilung anzunehmen.

3.2 Ergebnisse der Methodenprüfung

3.2.1 Errechnung der Variationskoeffizienten zur Beurteilung der Messvariabilität

Zur Beurteilung der Messvariabilität innerhalb der vier Messwiederholungen der gesunden Probanden (N=31) wurden die Quantilen bzw. die Mediane der Variationskoeffizienten (CV in%) aller Messwiederholungen für jedes Item errechnet. Die genaue Vorgehensweise der statistischen Errechnung hierzu wird in 3.1 beschrieben.

Daneben wurde der Interquartilsabstand bestimmt zur einfacheren Beurteilung der Streuung der Werte. Der Interquartilsabstand ist ein Streuungsmaß, welcher sich aus der Differenz des 75. und 25. Quartils berechnet und demnach die mittleren 50% der Strichprobenwerte enthält [160].

Die Mediane der Variationskoeffizienten sind aus der Verteilung der Daten zu entnehmen, die im vorhergehenden Kapitel 3.1.2 dargelegt sind. Der nachfolgenden Tabelle ist eine Übersicht der errechneten Variationskoeffizienten im Median für die jeweils einzelnen Items mit entsprechender Bewertungsstufe zu entnehmen.

Übersicht: Beurteilung der Messvariabilität mittels Bewertung nach Barrentine [6]

Item	CV%, Median (IQR)	IQR	Bewertungsstufe
Total Integral li	16.5 (11.2–22.4)	11,2	ausreichend
Total Integral re	21.8 (12.4–25.4)	13	grenzwertig akzeptabel
Integral <300 Hz li	16.9 (11.3–23.8)	12,5	ausreichend
Integral <300 Hz re	19.4 (10.6–24.5)	13,9	ausreichend
Integral >300 Hz li	20.5 (13.4–25.0)	11,6	grenzwertig akzeptabel
Integral >300 Hz re	20.0 (13.3–27.1)	13,8	ausreichend
>300 /<300 Ratio li	17.4 (12.6–26.8)	14,2	ausreichend
>300 /<300 Ratio re	18.4 (15.0–26.1)	11,1	ausreichend
Peak Amplitude li	16.0 (13.4–23.3)	9,9	ausreichend
Peak Amplitude re	16.4 (12.8–24.6)	11,8	ausreichend
Peak Frequency li	38.6 (25.4–59.6)	34,2	inakzeptabel
Peak Frequency re	63.0 (44.1–93.5)	49,4	inakzeptabel
Med. Frequency li	13.0 (8.7–17.0)	8,3	ausreichend
Med. Frequency re	14.1 (10.0–19.7)	9,7	ausreichend

Tabelle 7: Bei der Errechnung der Variationskoeffizienten (in %) zur Beurteilung der Messvariabilität mittels Bewertung nach Barrentine [6] liegen die meisten Ergebnisse im Bereich „ausreichend“. Ausnahmen stellen die Items „total integral re (CV=21,8%)“ sowie „integral >300 Hz li (CV=20,5%)“ bei grenzwertig akzeptabler Messvariabilität dar. Als inakzeptabel werden die Items Peak Frequency li (CV=38,6%) und re (CV=63%) bewertet. Die Interquartilsabstände als Maß für die Streuung reichen von 8,3 („Med. Frequency links“) als geringste Streuung bis 49,4 („Peak Frequency re“) als größte Streuung der Werte.

3.2.2 Errechnung des ICC zur Beurteilung der Reliabilität

Der ICC gilt als Maßzahl für die Reliabilität eines Tests [72]. Zur Bewertung des ICC werden die Richtlinien von Cicchetti et al. [18] herangezogen. Die vollständige statistische Auswertung befindet sich im Anhang unter 8.2.

Übersicht: ICC mit Bewertung nach Cicchetti et al. [18]

Item	ICC (95% CI)	Bewertungsstufe
Total Integral li	0,75 (0,65-0,85)	ausgezeichnet
Total Integral re	0,64 (0,52-0,77)	gut
Integral<300Hz li	0,73 (0,63-0,83)	gut
Integral <300Hz re	0,64 (0,52-0,77)	gut
Integral>300 Hz li	0,64 (0,0,53-0,77)	gut
Integral>300 Hz re	0,59 (0,47-0,73)	mittelmäßig
>300/<300 Ratio li	0,31 (0,21-0,46)	mangelhaft
>300/<300 Ratio re	0,48 (0,36-0,63)	mittelmäßig
Peak Amplitude li	0,52 (0,40-0,67)	mittelmäßig
Peak Amplitude re	0,48 (0,36-0,63)	mittelmäßig
Peak Frequency li	0,52 (0,40-0,67)	mittelmäßig
Peak Frequency re.	0,30 (0,19-0,45)	mangelhaft
Med. Frequency li	0,58 (0,46-0,72)	mittelmäßig
Med. Frequency re	0,56 (0,44-0,70)	mittelmäßig

Tabelle 8: Die Intraklassenkorrelationskoeffizienten reichen von 0,30 („mangelhaft“ im Item „Peak Frequency re“) bis 0,75 („ausgezeichnet“ im Item „Total Integral li“). Sieben der Items erreichen die Bewertungsstufe „mittelmäßig“, vier der Items lassen sich der Bewertungsstufe „gut“ zuordnen. Demgemäß sind die Ergebnisse (mit Ausnahmen) den Bewertungsstufen mittelmäßig bis gut zuzuordnen.

3.3 Ergebnisse der explorativen Untersuchung- Überprüfung der Messwerte zwischen JIA und Non-JIA-Probanden auf Signifikanz

Zur Verifizierung signifikanter Unterschiede der Werte in den Items *zwischen* den Gruppen (Non-JIA/JIA) wurde der Mann-Whitney-U-Test gewählt. Wenn $p < 0,05$ (Signifikanzniveau), liegt ein signifikanter Unterschied bezüglich der erhobenen Messdaten zwischen den JIA und NON-JIA-Probanden vor. Bei den 31 Non-JIA-Probanden wurden Werte von vier Messzyklen mit jeweils vier Vibrationen innerhalb einer Messung herangezogen (ergibt 496 Werte je Item beziehungsweise „Counts“ in der Statistik), wohingegen bei den 22 JIA-Probanden nur eine Messung mit vier Vibrationen und daraus resultierenden Werten mit einbezogen wurde (ergibt 88 Werte je Item beziehungsweise „Counts“ in der Statistik). Demgemäß ergibt der vollständige, in die Statistik einbezogene Datensatz eine Grundgesamtheit von $n=6944$ für die Non-JIA-Probanden, bzw. eine Grundgesamtheit von $n=1232$ für die JIA-Probanden. Die vollständige Statistik ist dem Anhang unter 8.1 zu entnehmen.

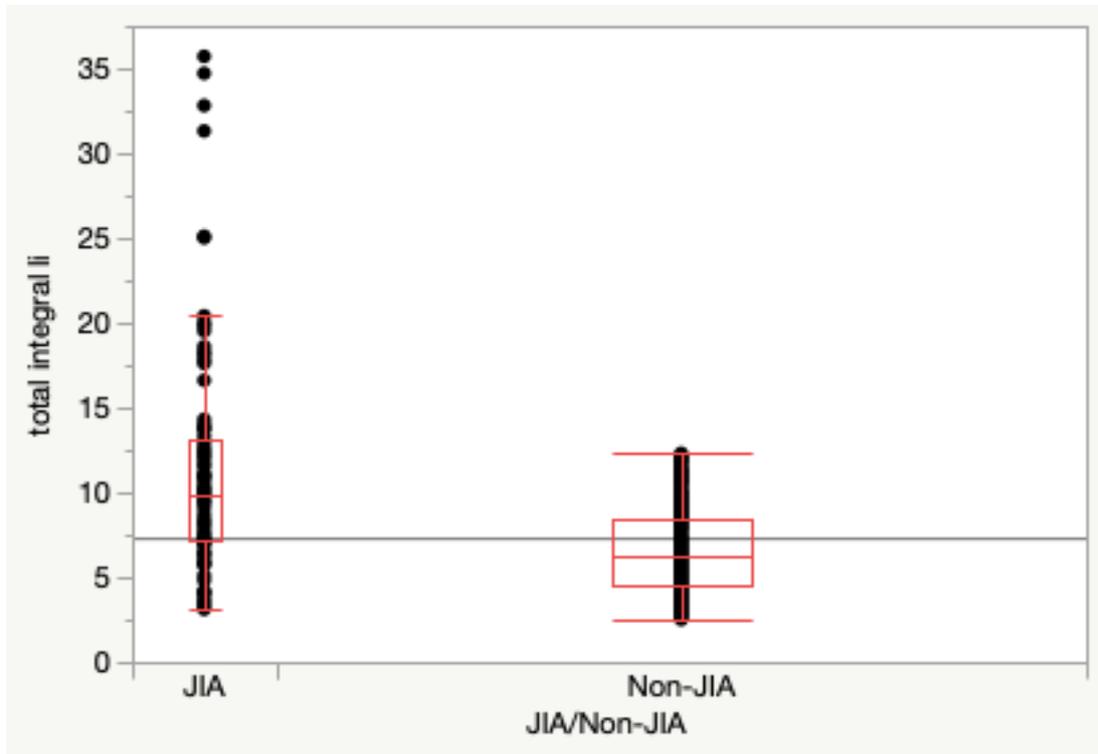
3.3.1 Übersicht: Mediane, Interquartilsabstände und p-Werte im Vergleich zwischen den Gruppen

Item	Median JIA	Median NON-JIA	IQR JIA	IQR NON-JIA	p-Wert
Total integral li *	9,9	6,2	6,075	3,9	0,0001*
Total integral re *	7,05	5,9	4,35	3,2	0,0005*
Integral < 300 Hz li *	7,15	5,1	4,325	3,3	0,0001*
Integral < 300 Hz re*	5,7	4,9	3,175	2,7	0,0001*
Integral > 300 Hz li *	2,1	1	2,09	0,7	0,001*
Integral > 300 Hz re *	1,5	1	1,8	0,6	0,0001*
>300/<300 Hz Rati li*	0,29	0,21	0,235	0,975	0,0001*
>300/<300 Hz Rati re*	0,275	0,22	0,175	0,09	0,0001*
Peak Amplitude li *	0,6	0,5	0,3	0,2	0,0001*
Peak Amplitude re	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2237
Peak Frequency li	125,5	124,5	142,25	175	0,8601
Peak Frequency re	118,5	80	157	172	0,1095
Med. Frequency li*	173	146	47	40	0,0001*
Med. Frequency re *	160	142	50	49	0,0001*

Tabelle 9: Die Übersicht der statistisch ermittelten p-Werte der Items bezüglich Signifikanz zwischen JIA/NON-JIA zeigt, dass die meisten p-Werte unter dem Signifikanzniveau von 0,05 (gekennzeichnet mit *) liegen, das heißt, in diesen Items sind signifikante Unterschiede der Vibrationswerte zwischen den Gruppen vorhanden. Nicht signifikant waren die Unterschiede in den Items „Peak Amplitude“ des rechten, sowie „Peak Frequency“ des rechten und linken KG. Die Mediane und Interquartilsabstände der JIA-Probanden liefern in der Mehrzahl der Items höhere Werte. Lediglich im Item „Peak Frequency“ des rechten KG beziehungsweise in den Items „Peak Frequency re“, „Peak Amplitude re“, und „>/<300 Hz Ratio li“, sind die Werte für den Median beziehungsweise die Interquartilsabstände niedriger oder weisen dieselben Werte auf.

3.3.2 Statistische Darlegung der Überprüfung der Werte auf Signifikanz zwischen JIA/Non-JIA-Probanden in den einzelnen Items

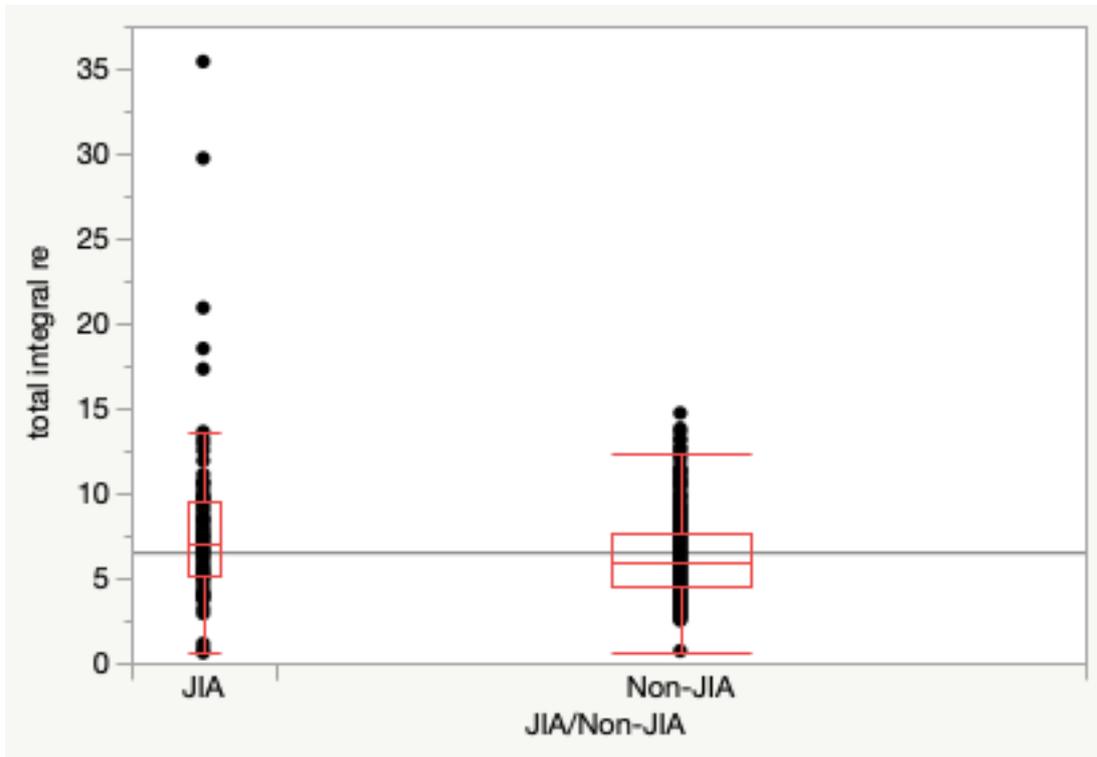
Item „Total Integral“ des linken Kiefergelenks



Linkes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	9,9	6,075	22	0,0001*
NON-JIA	6,2	3,9	31	

Abbildung 24: Zwischen beiden Gruppen liegt ein signifikanter Unterschied der Werte vor, da der p-Wert von $0,0001^* < 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden zeigt einen signifikant höheren Median. Zudem streuen die Werte der JIA-Probanden mehr, was aus dem größeren Interquartilsabstand ersichtlich wird.

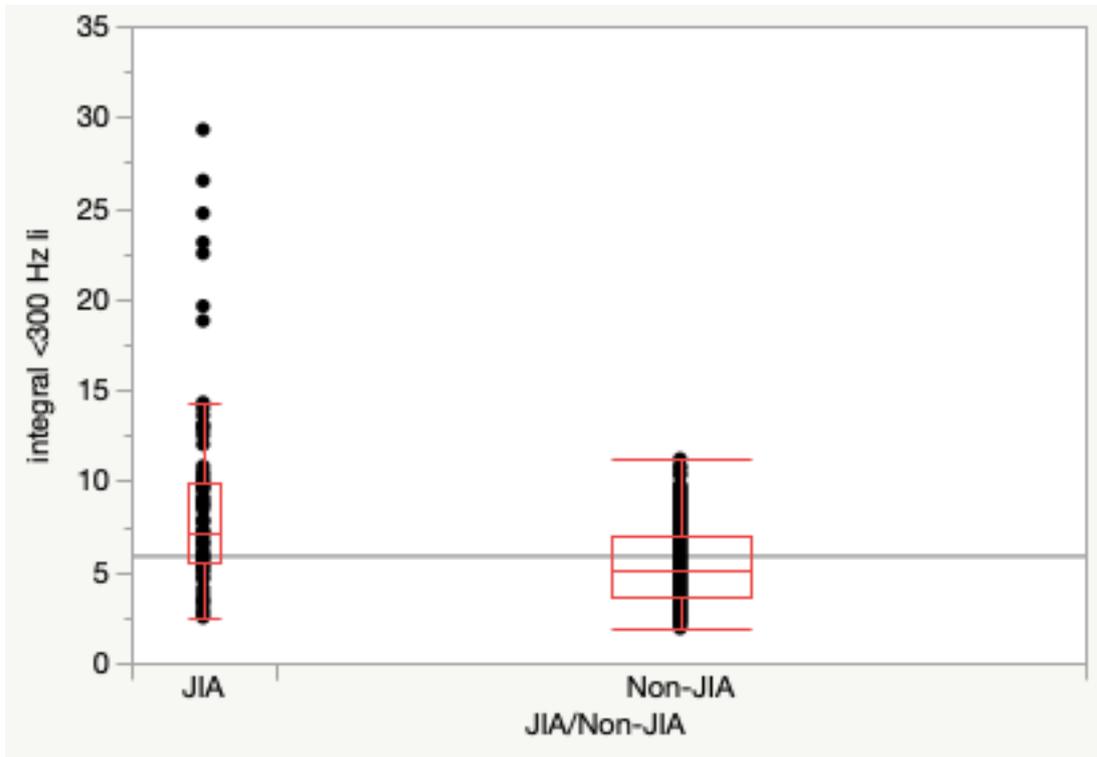
Item „Total Integral“ des rechten Kiefergelenks



Rechtes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	7,05	4,35	22	0,0005*
NON-JIA	5,9	3,2	31	

Abbildung 25: Zwischen beiden Gruppen liegt ein signifikanter Unterschied der Werte vor, da der p-Wert von $0,0005^* < 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden zeigt einen signifikant höheren Median. Zudem streuen die Werte dieser Gruppe mehr, was der größere Quartilsabstand zeigt.

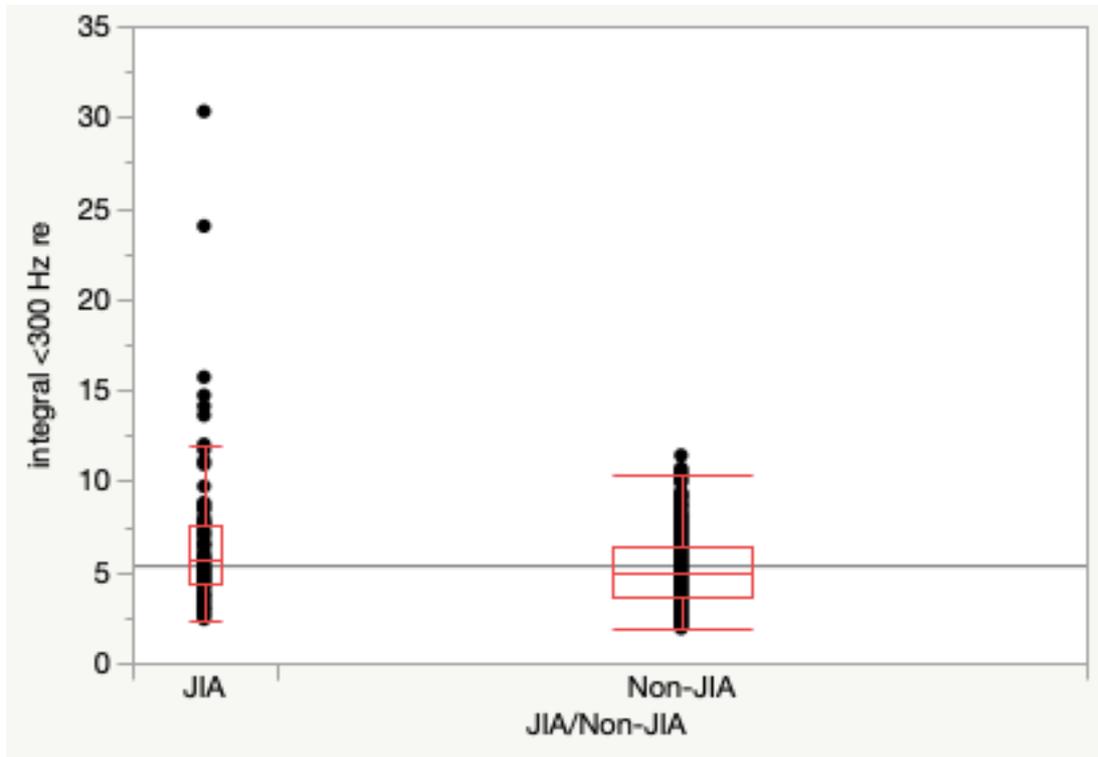
Item „Integral<300 Hz“ des linken Kiefergelenks



Linkes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	7,15	4,325	22	0,0001*
NON-JIA	5,1	3,3	31	

Abbildung 26: Zwischen beiden Gruppen liegt ein signifikanter Unterschied der Werte vor, da der p-Wert von 0,0001* < 0,05 (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden zeigt einen signifikant höheren Median.

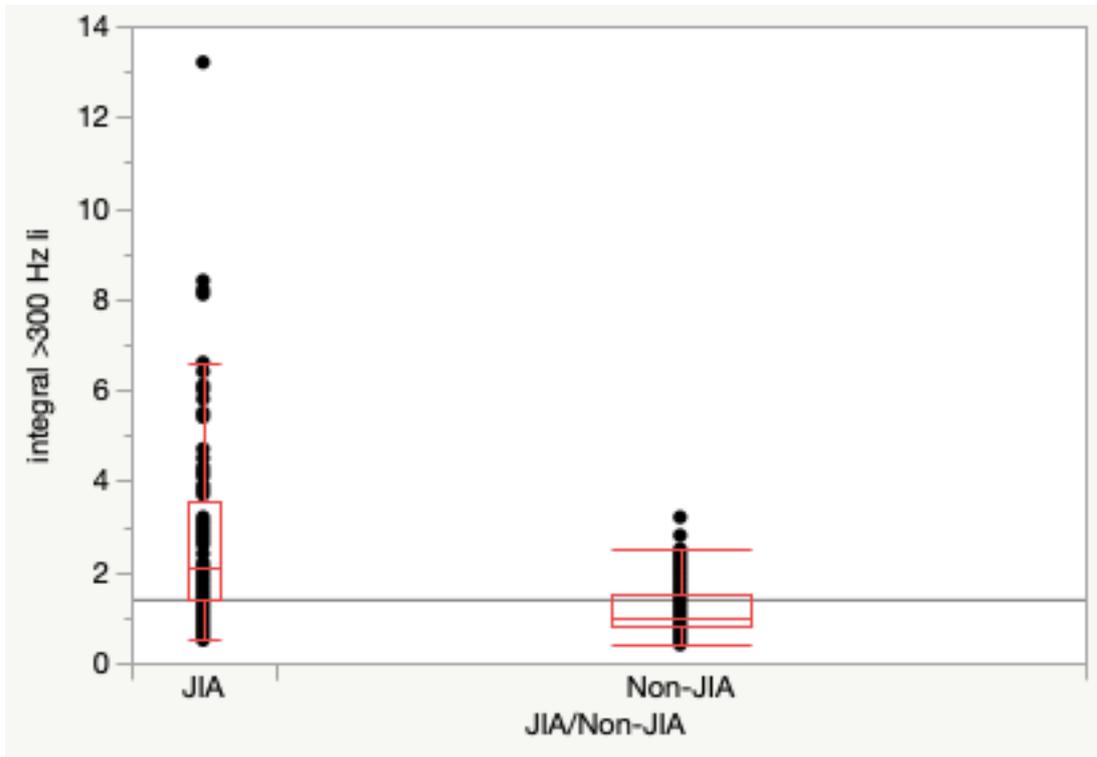
Item „Integral<300 Hz“ des rechten Kiefergelenks



Rechtes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	5,75	3,175	22	0,001*
NON-JIA	4,9	2,7	31	

Abbildung 27: Zwischen beiden Gruppen liegt ein signifikanter Unterschied vor, da der p-Wert von $0,001^* < 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden zeigt einen signifikant höheren Median. Zudem ist der Interquartilsabstand größer, was auf eine größere Streuung der Werte schließen lässt.

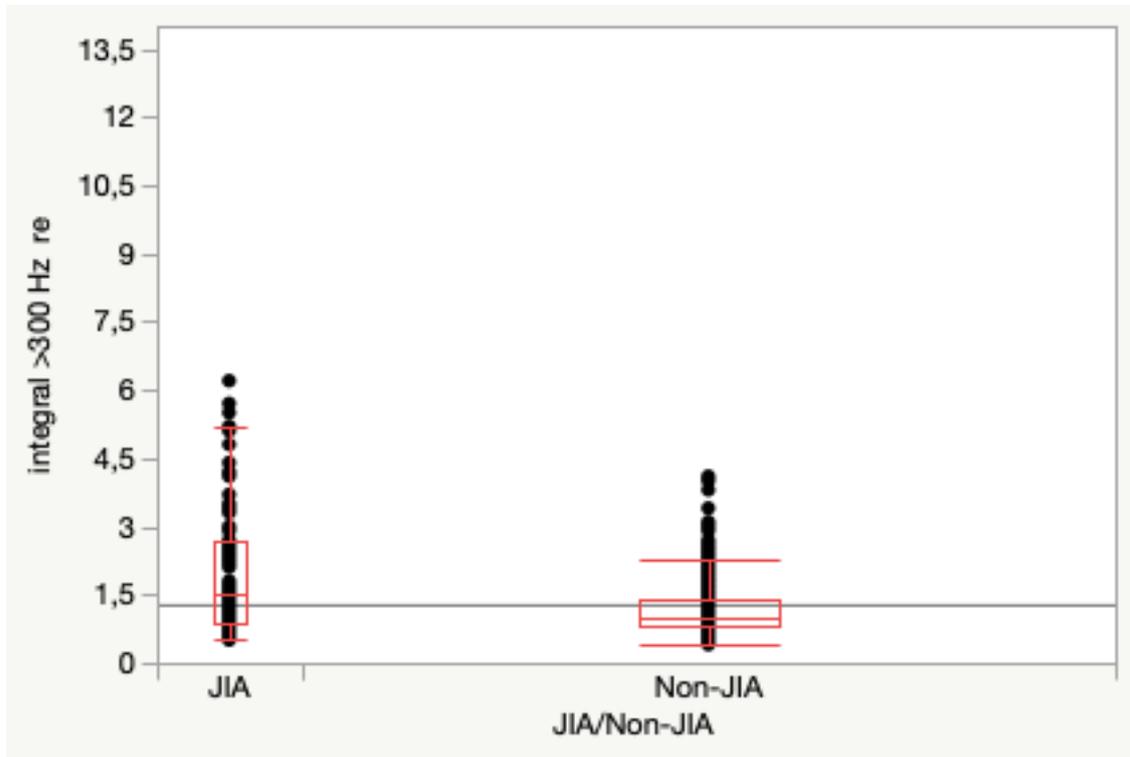
Item „Integral>300 Hz“ des linken Kiefergelenks



Linkes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	2,1	2,09	22	0,0001*
NON-JIA	1	0,7	31	

Abbildung 28: Zwischen beiden Gruppen liegt ein signifikanter Unterschied vor, da der p-Wert von $0,0001^* < 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden zeigt einen signifikant höheren Median. Zudem streuen in dieser Gruppe die Werte mehr, was der größere Interquartilsabstand zeigt.

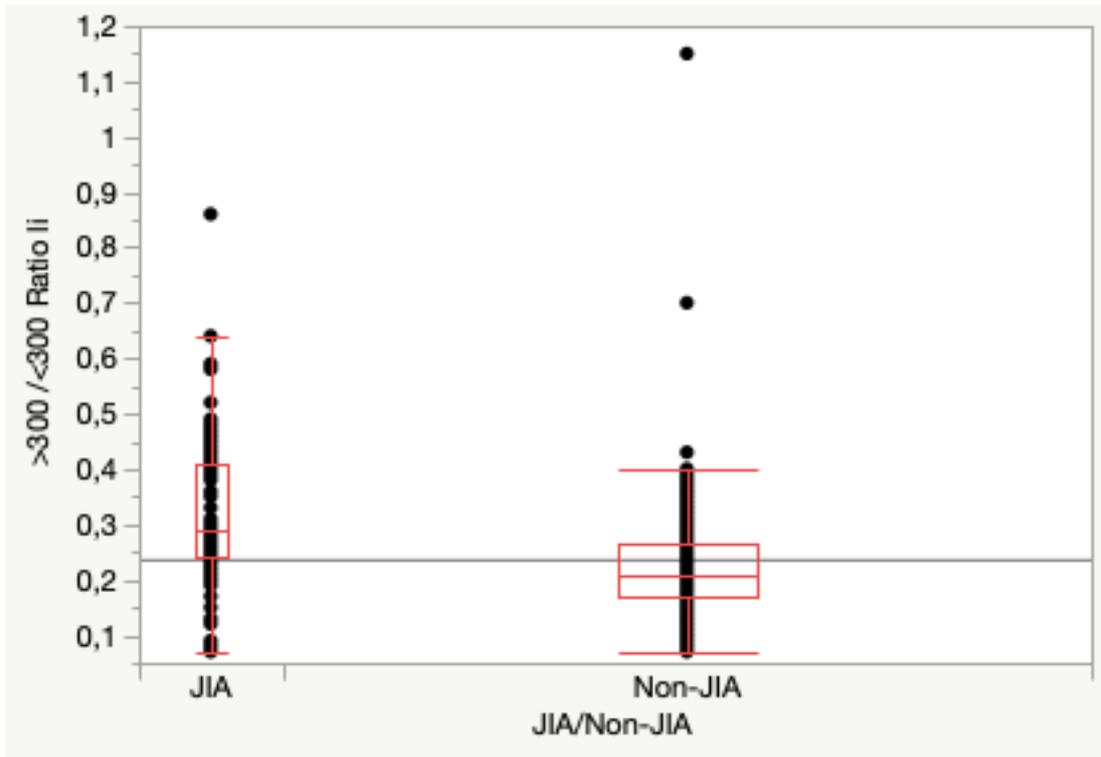
Item „Integral >300 Hz“ des rechten Kiefergelenks



Rechtes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	1,5	1,8	22	0,0001*
NON-JIA	1	0,6	31	

Abbildung 29: Zwischen beiden Gruppen liegt ein signifikanter Unterschied vor, da der p-Wert von $0,0001^* < 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden zeigt einen signifikant höheren Median. Der größere Interquartilsabstand in der JIA-Gruppe zeigt zudem eine größere Streuung der Werte.

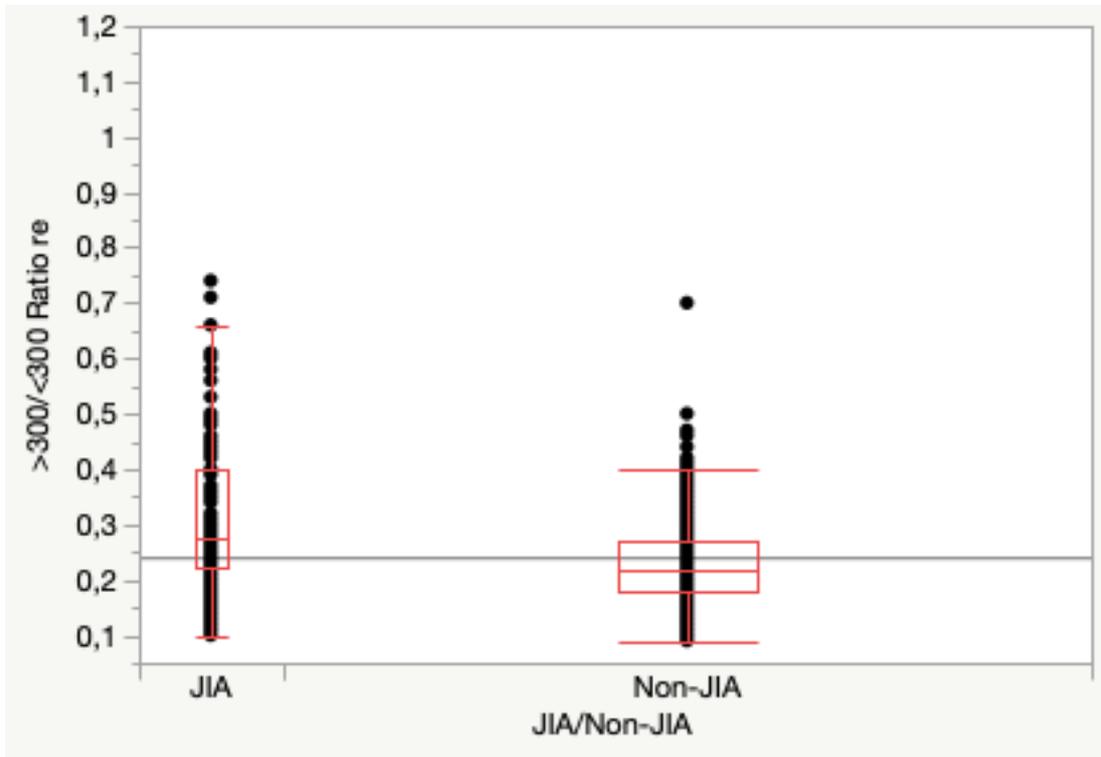
Item „>300/<300 Hz Ratio“ des linken Kiefergelenks



Linkes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	0,29	0,235	22	0,0001*
NON-JIA	0,21	0,0975	31	

Abbildung 30: Zwischen beiden Gruppen liegt ein signifikanter Unterschied vor, da der p-Wert von $0,0001^* < 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden zeigt einen signifikant höheren Median. Der Interquartilsabstand in der JIA-Gruppe ist größer, was auf eine größere Streuung der Werte schließen lässt.

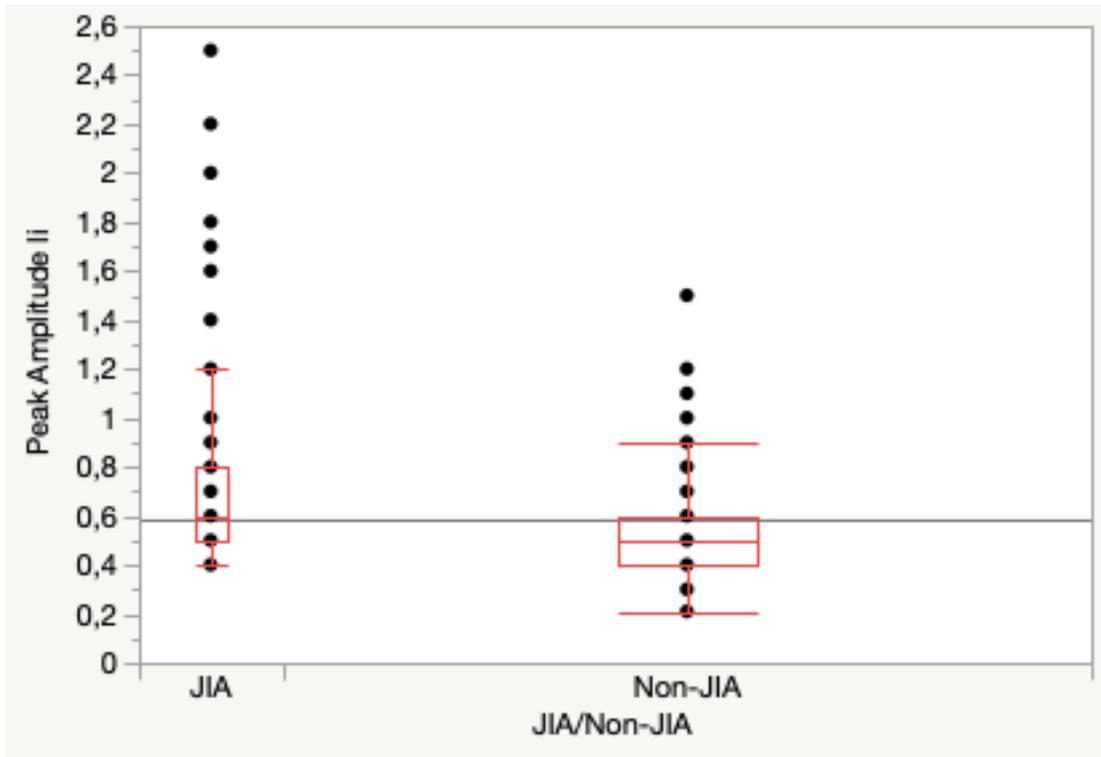
Item „>300/<300Hz Ratio“ des rechten Kiefergelenks



Rechtes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	0,275	0,175	22	0,0001*
NON-JIA	0,22	0,09	31	

Abbildung 31: Zwischen beiden Gruppen liegt ein signifikanter Unterschied vor, da der p-Wert von $0,0001^* < 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden zeigt einen signifikant höheren Median. Die Werte der JIA-Probanden streuen geringfügig mehr.

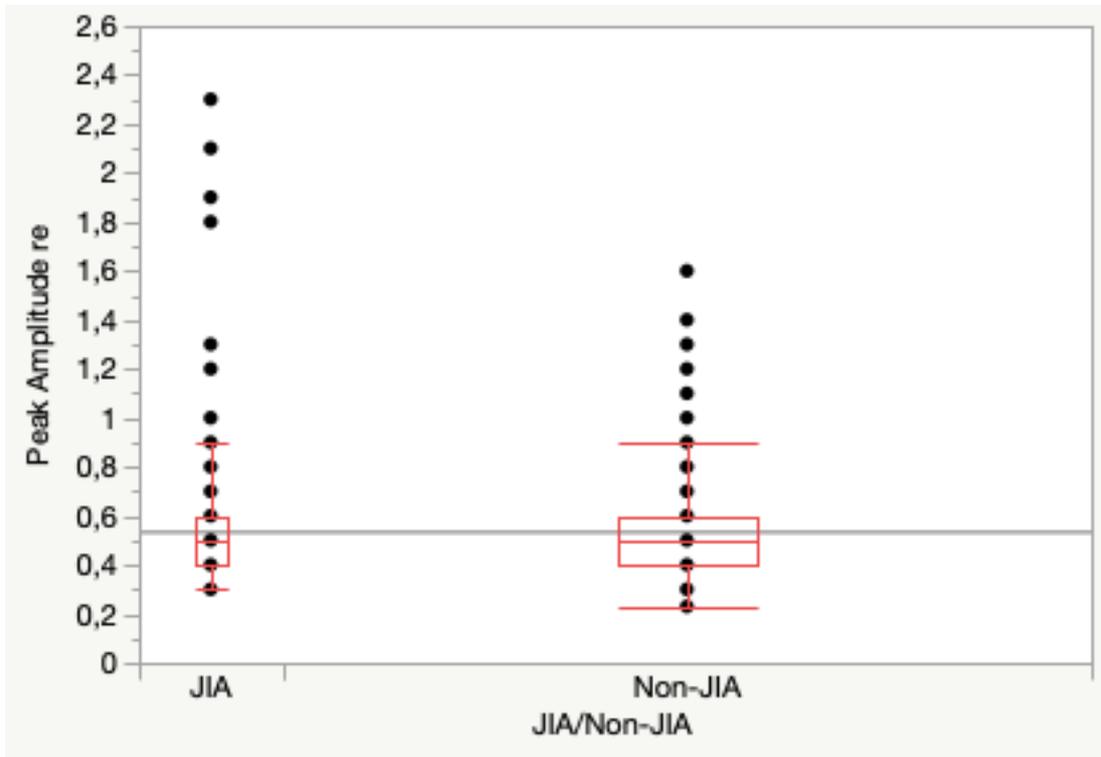
Item „Peak Amplitude“ des linken Kiefergelenks



Linkes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	0,6	0,3	22	0,0001*
NON-JIA	0,5	0,2	31	

Abbildung 32: Zwischen beiden Gruppen liegt ein signifikanter Unterschied vor, da der p-Wert von $0,0001^* < 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden zeigt einen signifikant höheren Median. Die Werte der JIA-Probanden streuen geringfügig mehr.

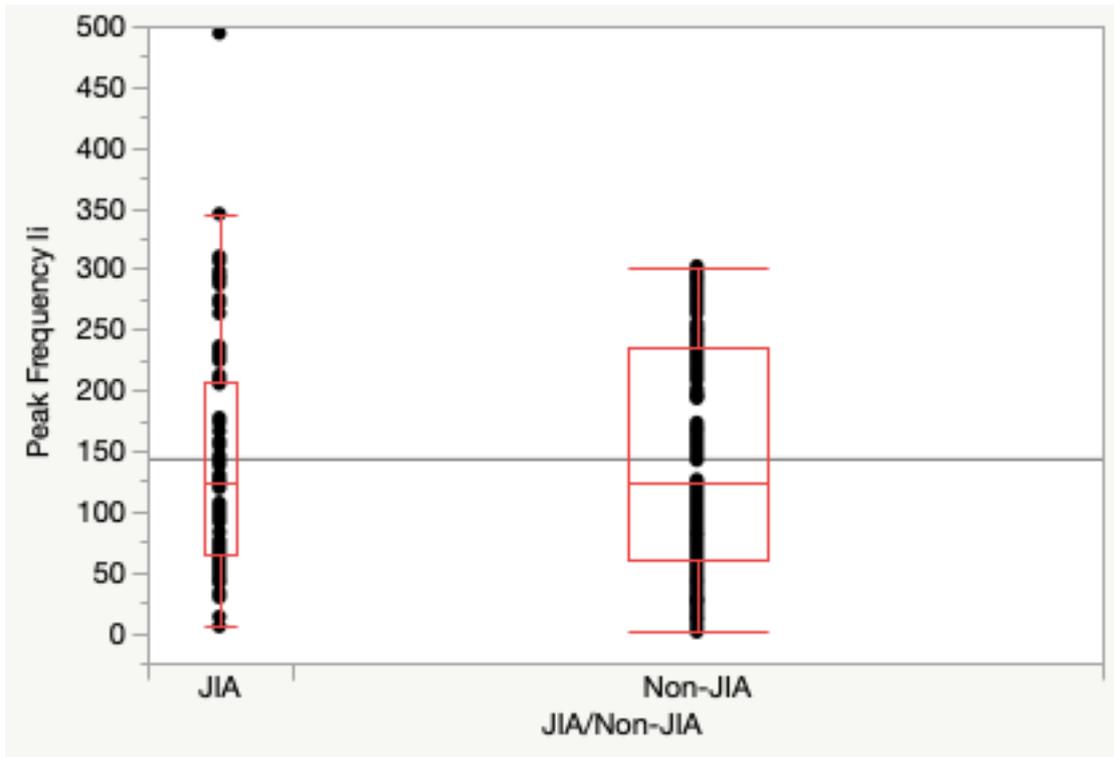
Item „Peak Amplitude“ des rechten Kiefergelenks



Rechtes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	0,5	0,2	22	0,2237
NON-JIA	0,5	0,2	31	

Abbildung 33: Zwischen beiden Gruppen liegt kein signifikanter Unterschied vor, da der p-Wert von $0,2237 > 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppen zeigen denselben sowohl im Median, als auch im Interquartilsabstand.

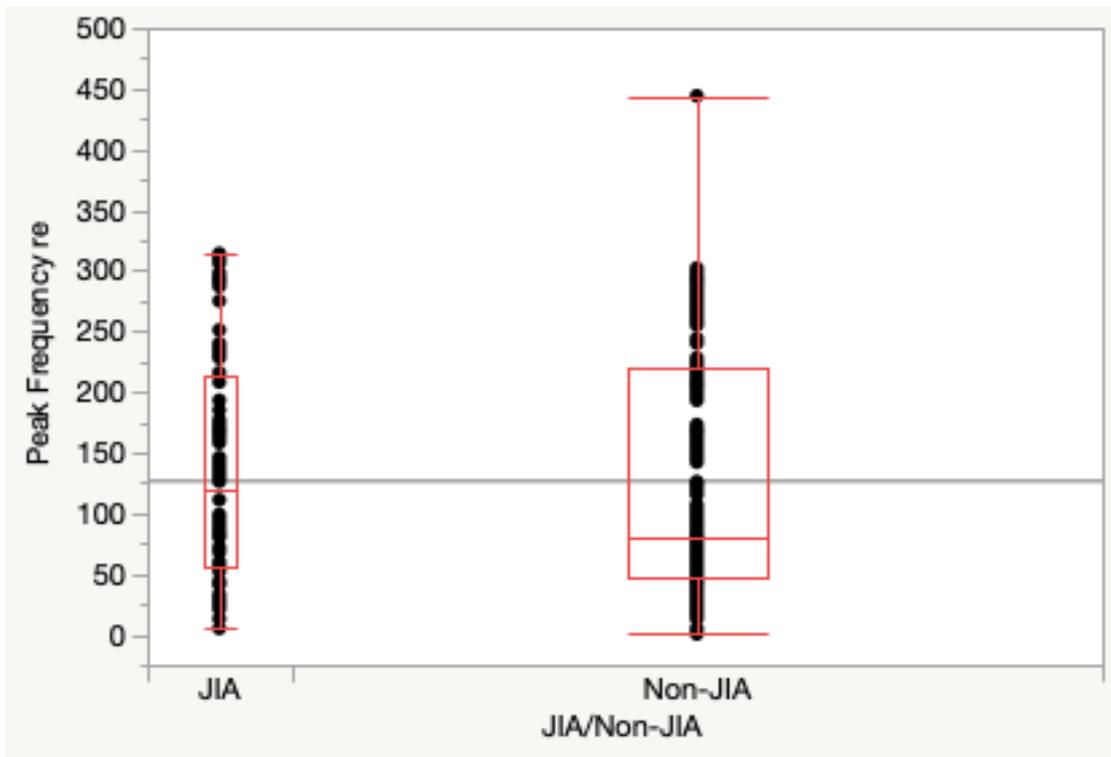
Item „Peak Frequency“ des linken Kiefergelenks



Linkes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	124,5	142,25	22	0,8601
NON-JIA	124,5	175	31	

Abbildung 34: Zwischen beiden Gruppen liegt kein signifikanter Unterschied vor, da der p-Wert von $0,8601 > 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden zeigt denselben Wert beim Median. Im Item „Peak Frequency li“ ist der IQR der JIA-Probanden deutlich größer, das heißt, die Werte der NON-JIA-Probanden streuen deutlich mehr.

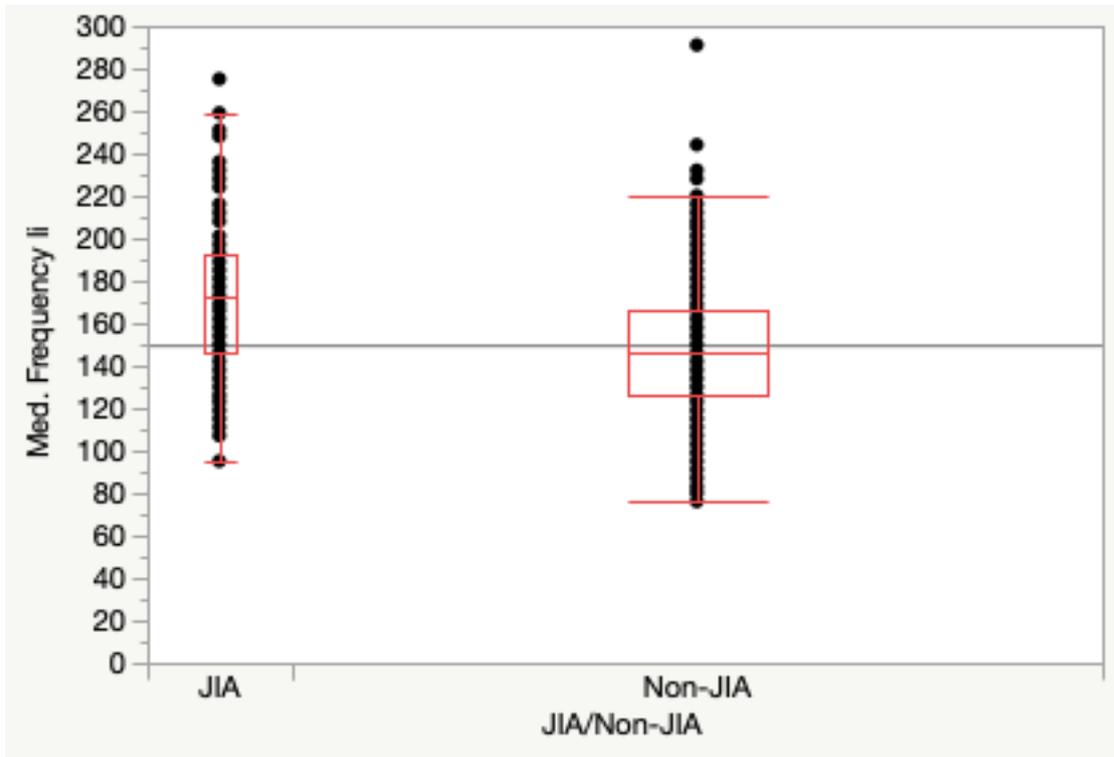
Item „Peak Frequency“ des rechten Kiefergelenks



Rechtes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	118,5	157	22	0,1095
NON-JIA	80	172	31	

Abbildung 35: Zwischen beiden Gruppen liegt kein signifikanter Unterschied vor, da der p-Wert von $0,1095 > 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden hat zwar einen höheren Wert im Median, im Gegensatz dazu ist der IQR der Non-JIA-Probanden deutlich größer. Das heißt, die Werte im Item „Peak Frequency re“ streuen die Werte der Non-JIA-Probanden mehr.

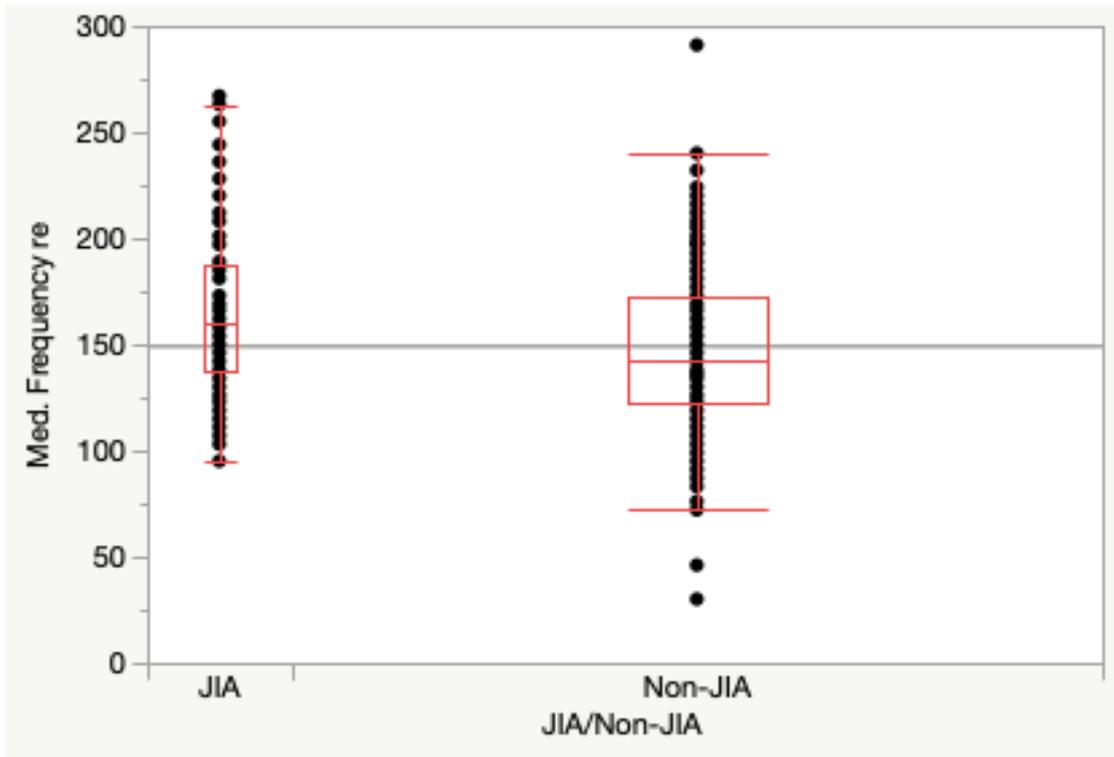
Item „Med. Frequency“ des linken Kiefergelenks



Linkes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	173	47	22	0,0001*
NON-JIA	146	40	31	

Abbildung 36: Zwischen beiden Gruppen liegt ein signifikanter Unterschied vor, da der p-Wert von $0,0001 < 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden einen signifikant höheren Wert beim Median. Der IQR ist größer in der Gruppe der JIA-Probanden. In dieser Gruppe streuen diese Werte auch im Item „Med Frequency li“ mehr.

Item „Med. Frequency“ des rechten Kiefergelenks



Rechtes KG	Median	Interquartilsabstand	N	p-Wert
JIA	160	50	22	0,0001*
NON-JIA	142	49	31	

Abbildung 37: Zwischen beiden Gruppen liegt ein signifikanter Unterschied vor, da der p-Wert von $0,0001^* < 0,05$ (Signifikanzniveau). Die Gruppe der JIA-Probanden hat einen signifikant höheren Wert beim Median, der Wert des IQR ist nur geringfügig größer. Die Werte streuen in dieser Gruppe geringfügig mehr.

4. Diskussion

4.1 Diskussion der Methodenprüfung

Das übergeordnete Ziel der Dissertation stellt die Methodenprüfung des elektronisch-instrumentellen Verfahrens Joint Vibration Analysis zur Quantifizierung von Kiefergelenkvibrationen dar. Grundlage für die Methodenprüfung bildeten Messwiederholungen. Es wurde die Messvariabilität und die Wiederholbarkeit (im Sinne der Reliabilität) vom Kiefergelenk emittierter Vibrationen von 31 für CMD gesunden Probanden bestimmt, indem die Variationskoeffizienten (CV) beziehungsweise die Intraklassenkorrelationen (ICC) mit 95% CI errechnet und mit dafür spezifischen Bewertungssystemen beurteilt wurden.

Von den 31 in die Gruppe und zur statistischen Auswertung eingeschlossenen Probanden waren 18 männlich (42%), 13 weiblich (58%) und im Alter von 20 bis 42 Jahren. Das Durchschnittsalter betrug 26,2 Jahre. Die Geschlechterverteilung ist nahezu ausgeglichen, die Altersspanne repräsentiert einen breiten Durchschnitt einer mittleren Alterskohorte. Bei allen Probanden wurde eine CMD ausgeschlossen. Dadurch wurde eine höhere Wertigkeit dieses Patientenkollektivs im Vergleich zu den JIA-Probanden erzielt, deren Daten in anonymisierter Form vorlagen und die Befunde unklar waren.

Messvariabilität

Als Maß für die Präzision von Messungen bei Messwiederholungen, also die Messvariabilität ([137] mit Verweis auf [22]), wurden die Variationskoeffizienten über alle Probanden je Item (sieben Items, jeweils rechtes und linkes KG, demgemäß 14) errechnet und mit dem Bewertungssystem nach Barrentine beurteilt. Die Messvariabilität konnte in den meisten Items demnach (mit Ausnahmen) überwiegend mit der Bewertungsstufe ausreichend (adequate) beurteilt werden. Die Variationskoeffizienten (CV) reichen in den Medianen von 13% als bestes Ergebnis, bis 63% als schlechtestes Ergebnis.

Die frequenzassoziierten Items:

Die frequenzassoziierten Items „Peak Frequency“ und „Med. Frequency“ zeigen kontroverse Ergebnisse. Als inakzeptabel in der Messvariabilität und somit schlechtestes Ergebnis aller Items wurde „Peak Frequency“ (mit Variationskoeffizienten von 38,8% im rechten und 63% linken KG) bewertet. Dort ist auch die größte Streuung der Werte mit einem IQR von 34,2 für das linke, beziehungsweise 49,4 für das rechte KG zu verzeichnen. Die geringste Messvariabilität und Streuung der Werte wies „Med Frequency“ mit 13% im linken und 14,1% im rechten KG als Variationskoeffizienten beziehungsweise einem IQR von 8,3 und 9,7 auf.

In Studien konnte aufgezeigt werden, dass die Frequenzen einer Vibration Information über den Zustand eines Kiefergelenks geben [60, 69, 116]. So konnte dargelegt werden, dass ein Knacken bei Frequenzen <300Hz auftritt, Frequenzen >300Hz hingegen mit degenerativen Gelenkerkrankungen und Krepitus assoziiert sind [59]. „Peak Frequency“ gibt dabei die Frequenz an, bei welcher die höchste Intensität einer Vibration auftritt [171]. In der Studie von Kondrat et al. [69] konnten für dieses Item, je nach Art der Dysfunktion im Klassifikationsschema nach Piper, unterschiedlich hohe Werte gemessen werden. Jedoch zeigt „Peak Frequency“ auch innerhalb gesunder Probanden in der Literatur eine breite Spanne an Werten [171], wie auch in vorliegender Dissertation. Hier variieren die Werte im Item Peak Frequency zwischen den Probanden ebenfalls stark. Zudem ist eine große Messvariabilität zu verzeichnen. Im Item „Peak Frequency“ werden die „Frequenzpeaks“ der Vibrationen vorliegend für CMD asymptotische Probanden abgebildet. Erklärbar könnte die hohe Messvariabilität mit der Tatsache sein, dass nicht signifikante, durch die Software vorgeschlagenen Vibrationen herangezogen wurden, sondern willkürlich Frequenzen „physiologischer“ Kieferbewegungen herausgegriffen wurden. Die Software zeigt die Werte mit der höchsten Amplitude. In vorliegender Dissertation werden Intervalle „vibrationsärmerer“ Areale quantifiziert, also mit niedrigerer Amplitude. So ist es wahrscheinlich, dass sich die Frequenz-Peaks der untersuchten, herausgegriffenen Vibration

(mit kleinerer Amplitude), während der Kieferbewegungen jeweils „verschieben“ und zu anderen Zeitpunkten zeigen.

„Median Frequency“ zeigt (im Frequenzspektrum) die Frequenz, bei der die Hälfte der Gesamtintensität einer Vibration darüber, die andere Hälfte darunter liegt [171]. In der Studie von Kondrat et al. [69] konnte der niedrigste Wert (Median von 72Hz) bei gesunden Probanden gemessen werden, den höchsten Wert (Median 173Hz) erzielten Probanden mit Bandlaxität. Honda et al. [48] stellten in diesem Item bei Probanden mit osteoarthrotischen Veränderungen hohe Werte um 140-170Hz fest. Vorliegend erzielte dieses Item das beste Ergebnis in der Messvariabilität, die Messungen waren dort also am präzisesten.

Die Integral-assoziierten Items:

Wenngleich sich Frequenzen einer Vibration also hilfreich zeigen in der Diagnosefindung [69, 116], finden diese frequenzassoziierten Items im JVA-Flowchart (siehe Abbildung 9) hingegen keine Berücksichtigung. Dort werden Integral-assoziierte Items („Total Integral“ und „Integral>300H) zur Diagnosestellung herangezogen. Vorangestellt im Flowchart wird das Item „Total Integral“. Es gibt die Fläche unter Kurve im Frequenzspektrum an, also die Gesamtintensität der Vibrationsenergie [42]. In Studien konnte gezeigt werden, dass normale Kiefergelenke niedrigere Werte in „Total Integral“ aufwiesen als abnormale oder dysfunktionale KG [26, 69]. Vorliegend waren in diesem Item die Messungen für das linke und rechte KG unterschiedlich präzise. So auch im Item Integral>300Hz. Dort wurde jedoch für das linke Kiefergelenk die bessere Bewertungsstufe (ausreichend) um nur 0,5% verfehlt.

„Integral>300Hz“, zeigt die Fläche unter der Kurve im Frequenzspektrum von 301-500Hz an [42] und wird ebenfalls im JVA-Flowchart herangezogen. In Studien konnte ein Zusammenhang dieses Items mit degenerativen Veränderungen aufgezeigt werden [56, 115].

Ebenso assoziiert mit degenerativen Gelenkveränderungen ist das Item „>300/<300Hz Ratio“. Je weiter der degenerative Zustand fortgeschritten ist, desto größere Werte nimmt dieses Item an [51] mit Verweis auf [59]. Hwang et al. [51] konnten in ihrer Studie aufzeigen, dass „>300/<300Hz Ratio“ neben

dem Frequenzmuster als Ausgangspunkt für einen Behandlungsbeginn bei Kiefergelenkgeräuschen herangezogen werden kann. Dieses Item konnte vorliegend mit ausreichend in der Messvariabilität bewertet werden.

Die Amplituden-assozierten Items:

Peak Amplitude (in N/m^2) zeigt die Hörbarkeit von Kiefergelenkgeräuschen [42] und widerspiegelt den höchsten Wert der aufgenommenen Vibrationen im Frequenzverteilungsspektrum. Ab 6 N/m^2 wird das Geräusch für den Probanden selbst hörbar [162]. Im Median erzielten gesunde Probanden in der Studie von Kondrat et al. [69] um 1.1 N/m^2 , vorliegend zeigt sich bei den Non-JIA-Probanden ein Median von $0,5 \text{ N/m}^2$. Dieses Item erzielte ebenfalls die Bewertungsstufe ausreichend.

Insgesamt ist die Messvariabilität in zehn von 14 Items mit „ausreichend“ zu bewerten, als grenzwertig akzeptabel beziehungsweise inakzeptabel („Peak Amplitude re und li“ zeigen sich zwei der Items („Total Integral re“, „Integral>300Hz li“ beziehungsweise „Peak Amplitude“). Die Bewertungsstufe „hervorragend“ konnte in keinem der Items erzielt werden. Vorwiegend am präzisesten in der Messung zeigten sich die im JVA-Flowchart zur Diagnosestellung herangezogenen Integral-assozierten Items.

Reliabilität

Zur Bestimmung der Reliabilität wurde der ICC mit 95% Konfidenzintervall errechnet. Die Werte für die Intraklassenkorrelationen Werte reichen von 0,3 als schlechtes Ergebnis, bis 0,75 als bestes Ergebnis.

Zieht man zur Bewertung der Ergebnisse die Richtlinien von Cicchetti [18] heran, zeigt sich das Ergebnis ebenfalls gemischt. Die im Flowchart zur Diagnosestellung herangezogenen integral-assozierten Items erzielten die reliabelsten Ergebnisse. Im Item „Total Integral li“ konnte die Bewertungsstufe hervorragend, in den Items „Total Integral re“, „Integral<300Hz li und re“ sowie „Integral>300Hz li“ die Bewertungsstufe gut in Bezug auf die Reliabilität vergeben werden. Mangelhaft bewertet wurden zwei der Items („>/<300Hz li“, „Peak Frequency re“). Den übrigen sieben Items konnten die Bewertungsstufe

mittelmäßig zugeordnet werden, wobei das Item „Integral>300Hz re“ die bessere Bewertungsstufe (gut) um lediglich 0,01 verfehlte.

Insgesamt sind die vorliegenden Ergebnisse bezüglich ICC folglich (mit Ausnahmen) auch hier den Bewertungsstufen „mittelmäßig“ bis „gut“ in Bezug auf die Reliabilität zuzuordnen. Auch hier erzielten die im JVA-Flowchart zur Diagnosefindung herangezogenen Integral-assoziierten Items bessere Ergebnisse.

4.1.1 Vergleich mit anderen Studien/Publikationen

Im Laufe der Zeit befassten sich Wissenschaftler mit der Reproduzierbarkeit von Kiefergelenkgeräuschen anhand verschiedener Items, welche durch elektronische Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen ermittelt wurden und erhielten dabei sowohl gute bis hervorragende [17, 132, 171], als auch kontroverse Ergebnisse [139]. Christensen und Orloff [17] testeten die Reproduzierbarkeit der Kiefergelenkgeräusche zwischen drei Messzyklen bei lediglich fünf Probanden und konnten eine ausgezeichnete Reliabilität für die Methode der elektronischen Registrierung feststellen. Aussagekräftiger stellen sich die Studien von Zhang et al. [171] und Sharma et al. [132] dar, da sie mehr Probanden testeten.

Zhang et al. [171] testeten die Reproduzierbarkeit von Kiefergelenkgeräuschen mittels JVA bei 34 Probanden zwischen drei hintereinander aufgenommenen Messzyklen in Abständen von drei Minuten an einem Tag, und mit einer Latenz von einer Woche mit derselben Anzahl an Messzyklen. Sie konnten unter anderem durch Errechnung des ICC für dieselben Items (außer „Integral>300Hz“ sowie „Integral<300Hz“) eine gute bis exzellente Reliabilität in allen Items aufzeigen.

In der Studie von Sharma et al. [132] wurde unter anderem die Reliabilität für JVA bei 36 Probanden (mit Discusverlagerung mit Reposition) in Abständen von 30 Minuten für dieselben Items wie in vorliegender Dissertation getestet. Außer im Item „>300/<300Hz Ratio“ konnte auch in dieser Studie eine

exzellente Reliabilität der gemessenen Werte zwischen beiden Aufnahmezyklen aufgezeigt werden.

Die innerhalb der Dissertation untersuchten Probanden waren für CMD asymptotisch. Unstrittig bleibt, dass Kiefergelenkgeräusche auch bei asymptotischen Probanden registriert werden können [17, 42, 102, 171]. Zhang [171] beschreibt, dass genau die Homogenität dieses Patientenkollektivs sich erwartungsgemäß positiv auf die Messvariabilität und Reproduzierbarkeit der Vibrationen auswirken sollte, zumal CMD-induzierte, sich über die Zeit verändernde pathologische Zustände der Kiefergelenke ausgeschlossen werden sollten.

Demgemäß sollte sich die vorliegend fehlende Latenzzeit zwischen den Messzyklen vorteilhaft auf die Variabilität der Messwerte und Reliabilität auswirken, wenngleich morphologische Veränderungen der Gelenke, wie zum Beispiel Discusperforationen und/oder Arthrose, einem längerfristigem Prozess unterworfen sind [130]. Die Reliabilität der instrumentellen Methode ist in vorliegender Dissertation in Bezug auf verschiedene Items (mit Ausnahmen) mittelmäßig bis gut bewertet. Eine mögliche Erklärung für vorliegend vergleichsweise dennoch „weniger guter“ Ergebnisse als in oben genannten Vergleichsstudien [132, 171] könnten bereits Christenssen und Orloff [17] in ihrer Studie mit einem die Reproduzierbarkeit beeinflussenden Aspekt liefern: sie diskutieren in ihrer Studie, dass die vom Kiefergelenkgeräusch abgegebene Vibrationen nicht immer gleich sind, woraus differierende Werte resultieren können. Gründe für differierende Werte beziehungsweise geräuschproduzierende Ereignisse werden wiederum von verschiedenen Autoren beschrieben. Genannt werden die physische Unfähigkeit des Individuums, immer gleiche Kieferbewegungen auszuführen [152], gelenkinterne Veränderungen wie zum Beispiel Ligamentverlängerung, Aktivitätsveränderungen der Mm. pterygoidei laterales oder Discus-Lageveränderungen, temperaturinduzierte Viskositäts-Veränderungen der Synovia [102, 171], intermittierende Strömungsverhältnisse der Synovialflüssigkeit und Unregelmäßigkeiten oder Defekte der Gelenkflächen [112].

Ligamentverlängerungen werden in der Literatur ([69] mit Verweis auf [101]). als Folge länger auf die KG-Strukturen einwirkender Kräfte oder einer einmalig hohen Krafteinwirkung beschrieben. So sind zum Beispiel auch innerhalb der Messwiederholungen stattgehabte Ligamentverlängerungen mit daraus resultierenden typischen veränderten Vibrationsmustern und Werten innerhalb JVA ([66] als Grund für die vorliegende Messvariabilität eher als unwahrscheinlich zu betrachten.

Da Kiefergelenkgeräusche, besonders ein Knacken, fluktuierend auftreten können [143] (mit Verweis auf [71, 80, 87]) könnten zudem Messvariabilität oder mangelnde Reproduzierbarkeit erklären. In der Literatur konnten für Discusverlagerung mit Reposition, welche am häufigsten mit einem Knacken assoziiert ist [30], im Vergleich zu asymptomatischen Probanden signifikant höhere Werte in den Items gezeigt werden [49]. In vorliegender Dissertation wurden nicht explizit „signifikante“ Kiefergelenkgeräusche herangezogen, sondern die Vibrationen außerhalb eines durch die Software verifizierbaren potentiell flüchtigen signifikanten „Knackphänomens“. Erwartungsgemäß sollten die Werte sich vorliegend eher weniger variabel zeigen, da eine vermeintlich „stabilere“ Situation der artikulierenden Kiefergelenke beleuchtet wird.

Gründe für die vorliegende Messvariabilität in erwarteten „stabilen“ Verhältnissen des artikulierenden Kiefergelenks, das heißt, losgelöst von potentieller Fluktuation signifikanter Geräusche wie einem „Knacken“ könnten von Prinz [112] dargelegte geräuschproduzierende Ereignisse sein: neben turbulenter Strömungsverhältnisse der Synovialflüssigkeit bei Kieferbewegungen führt er als Grund Unregelmäßigkeiten in den Gelenkoberflächen auf, welche abhängig von der Geschwindigkeit der bewegten Strukturen zu emittierten Impulsen führen.

Huang et al. [49] nennen physiologische Schwankungen der anatomischen Strukturen als Grund für Kiefergelenkgeräusche bei „normalen“ Kiefergelenken. Der Messvariabilität in vorliegender Dissertation zugrunde liegen könnten folglich zudem beschriebene physiologische Schwankungen der anatomischen Strukturen in Form registrierter veränderter Strömungsverhältnisse der Synovialflüssigkeit bei Kieferbewegung. Diese Hypothese stützen Olivieri et al.

[102] in ihrer Studie. Sie registrierten Kiefergelenkvibrationen asymptomatischer Probanden während der Mundöffnungs- und Mundschlussphasen mittels JVA und konnten dabei einen Anstieg der Werte bei Mundöffnung verzeichnen, wobei sie die Bewegung der Synovialflüssigkeit und der Gelenkstrukturen verantwortlich machen. Dabei beziehen sie sich auf eine Studie [19], in der das Verhalten der Synovialflüssigkeit auf Gelenkknorpel untersucht wurde.

Wabeke et al. [152] sehen zudem die Unfähigkeit des Individuums ständig gleiche Unterkieferbewegungen auszuführen als Grund für variable Werte. Die in vorliegender Dissertation zur Auswertung herangezogenen Vibrationen entstammen mehreren Messwiederholungen, in welchen die Probanden innerhalb einer Messung zehn Sekunden mindestens sechs Mundöffnungs- und Mundschlussbewegungen bis zur maximalen Mundöffnung ausführten. Mit Fortschreiten der Messungen sind Ermüdungserscheinungen der Muskulatur bei zunehmender mangelnder Koordination und Unkonzentriertheit der Probanden sowie unterschiedliche Geschwindigkeiten der getakteten Unterkieferbewegungen anzunehmen, wenngleich ein Metronom versuchte, diese gleichmäßig einzufordern. Schwankungen der anatomischen Gelenkstrukturen bei minimalen gelenkinternen Veränderungen mit unterschiedlichen emittierten Vibrationen und folglich Auswirkung auf die Messvariabilität und Reproduzierbarkeit wären folglich sehr wahrscheinlich.

Ein weiterer Grund für Messvariabilität und mangelnde Reproduzierbarkeit der Vibrationen könnten externe und interne Artefakte bei der Aufnahme darstellen. In einer aktuellen Studie, in welcher Kiefergelenkvibrationen simultan mit einem Mikrofon und JVA registriert wurden, konnte in beiden Systemen eine Empfindlichkeit gegenüber internen Artefakten wie zum Beispiel Gefäßgeräuschen gezeigt werden. Gegenüber Hintergrundgeräuschen zeigte sich JVA resistent [163]. So wurden in vorliegender Studie sehr wahrscheinlich tatsächlich emittierte Kiefergelenkvibrationen registriert. Dennoch sollten in vorliegender Dissertation Gefäßgeräusche als interne Artefakte mit Einfluss auf die Messvariabilität und Reproduzierbarkeit in Betracht gezogen werden, zum

Beispiel im Falle eines unbemerkten Verrutschens der Messfühler während der Aufnahme.

4.1.2 Vergleich mit anderen Methoden

Neben elektronischer Registrierung können Kiefergelenkgeräusche anamnestisch und klinisch in verschiedenen Diagnostiksystemen für CMD erfasst werden [3, 12, 104], darunter die international anerkannte und weit verbreitete RDC/TMD [82]. Obwohl diese in Studien bereits als reliabel und valide beschrieben wurde [62, 63], und in der aktuellen Literatur zwar als geeignetes Verfahren zur klinischen Untersuchung genannt wird, wird jedoch die Komplexität und die zeitliche Dauer des Verfahrens als routinemäßiges Screening kritisiert [120], ebenso in Bezug auf JIA-Patienten [135]. So ist die RDC/TMD zwar validiert für CMD, nicht aber für die juvenile idiopathische Arthritis [77]. JVA Quick hingegen (ohne Anwendung des Elektrognathographen) erlaubt eine elektronische Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen in weniger als 2 Minuten [66]. Ein weiterer Vorteil der elektronischen Registrierung ist die Möglichkeit der Speicherung der Daten [66].

Zudem kann die Methode der klinischen Untersuchung in Bezug auf die Erfassung von Kiefergelenkgeräuschen durch Auskultation und Palpation, wie sie auch von der RDC/TMD erfasst werden, Schwierigkeiten hervorbringen, unter anderem bezüglich der Lokalisation des Kiefergelenkgeräuschs [167, 169]. Bereits 1966 beschreibt Watt [154] die Schwierigkeit der Erfassung der Seitenlokalisierung eines Geräuschs, beziehungsweise eines Knackens, wobei vermeintlich „stille“ Gelenke als knackende Gelenke gehört werden. Gefiltert durch Gewebe des Kopfes erreicht ein einseitiges Kiefergelenkgeräusch (vor allem Knacken) mit einer Verzögerung von durchschnittlich einer Millisekunde oder weniger auch die kontralaterale Seite [168]. Dieser Unterschied wird aber vom Untersuchenden in der Auskultation nicht wahrgenommen. Das heißt, es werden in beiden Gelenken Geräusche registriert [167], was zu einer fehlerhaften Diagnose führen kann [169]. Eine elektronische Registrierung lässt die Detektion der Seitenlokalisierung zu [167], auch explizit Joint Vibration

Analysis [125]. Desweiteren wird die Palpation bei schwachen Kiefergelenkgeräuschen als wenig sensitiv beschrieben [84, 85, 171]. Für das menschliche Ohr ist es schwierig, die subtilen Unterschiede bezüglich Lokalisation, Dauer, und Latenzzeit einzelner Geräusche des Kiefergelenks zu unterscheiden [113] sowie überhaupt zu hören. Für Frequenzen im Bereich von 500-5000Hz ist das Ohr am empfänglichsten ([139] mit Verweis auf [20]). In einer Studie von Tallents et al. [139] wiesen die meisten Vibrationen eine für das menschliche Ohr schwierig zu detektierende Frequenz um 100 Hz auf. Eine klinische Untersuchung, (so also auch die RDC/TMD) kann Kiefergelenkgeräusche daher „überhören“, da viele Vibrationen in einer für das menschliche Gehör nicht erfassbaren Frequenz auftreten ([105] mit Verweis auf [139]). Die elektronische Registrierung vermag solche Geräusche zu detektieren [105]. JVA verfügt über einen Frequenzbereich von 25Hz bis 10000Hz [171]. Dies verdeutlicht, warum die elektronische Registrierung in der Literatur als eine objektivere Methode als Auskultation und Palpation dargestellt wird [125, 162]. So beschreiben verschiedene Autoren in ihren Studien die elektronische Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen als ein der klinischen Untersuchung überlegenes Verfahren [17, 165]. Beispielsweise zeigte die elektronische Registrierung mittels EVG (also JVA) in der Studie von Ishigaki et al. [55] im Vergleich zur klinischen Untersuchung eine höhere Sensitivität und Spezifität für die Zuordnung intraartikuläre Störung oder normale Gelenkanatomie.

Unstrittig bleibt auch die Tatsache, dass eine Bildgebung in Form einer MRT und/oder Arthrographie, CT und/oder Arthrographie intraartikuläre Störungen oder degenerative Erkrankungen suffizienter diagnostizieren kann als die klinische Untersuchung [54, 88, 106, 142]. Ishigaki et al. [60] beschreiben das elektronischen Verfahren dabei als Möglichkeit, es bei CMD-Symptomen als Screeningverfahren zur Erkennung des Vorhandenseins einer intraartikulären Störung oder degenerativen Erkrankung einzusetzen, um eine adäquatere Indikationsstellung für eine (teure) Bildgebung erzielen zu können.

Ein Systematic Review aus dem Jahre 2013 [133], in welchem 14 Studien zur Ermittlung der Validität (und eine Studie zur Ermittlung der Reliabilität) einbezogen wurden, konnte für JVA eine Sensitivität zwischen 50%-100%, und

eine Spezifität zwischen 59%-100% aufzeigen. Das Ergebnis wird von den Autoren allerdings als fragwürdig deklariert. Unter anderem kritisieren sie unterschiedliche Bildgebungsverfahren als Referenzstandards zur Identifizierung von Kontroll- und Testgruppe oder die Verwendung nicht standardisierter Klassifikationsschemata. Schlussfolgernd bietet das Review laut Autoren keine überzeugende Evidenz für die Reliabilität und Validität des JVA.

4.1.3 Schlussfolgerung für die Methodenprüfung

Die Methodenprüfung in vorliegender Dissertation zeigt schlussfolgernd gemischte Ergebnisse. Die elektronische Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen beziehungsweise Vibrationen mittels JVA hat wie vorausgehend dargelegt durchaus Vorteile. Vorliegend konnte JVA Kiefergelenkvibrationen asymptomatischer Probanden bei Messwiederholungen (mit Ausnahmen) mit mittelmäßiger bis guter Reliabilität reproduzieren, die Messvariabilität zeigte sich in den meisten Items (mit Ausnahmen) in der zweitbesten Bewertungsstufe ausreichend. Die Frage, warum einige Items eine große Messvariabilität und mangelnde Reproduzierbarkeit aufwiesen, kann final nicht ausreichend beantwortet werden. Weitere Studien mit größeren Fallzahlen sollten stattfinden, um den Einfluss intraindividuelle Schwankungen anatomischer Strukturen des Kiefergelenks auf die Messvariabilität und Reproduzierbarkeit der Vibrationen zu verifizieren. Ein möglicher Ansatz wäre, den Einfluss der Unterkiefergeschwindigkeit auf Strömungsverhältnisse der Synovia mit daraus resultierenden Werten entstehender Vibrationen darzulegen.

4.1.4 Limitationen der Methodenprüfung

Die vorliegend herangezogenen Vibrationen sind benutzerdefinierten Ursprungs außerhalb signifikanter Vibrationen. Dementsprechend widerspiegeln vorliegend herangezogene Vibrationen Ausschnitte „vibrationsärmerer“ Intervalle artikulierender Gelenke. Auf der Internetpräsenz des JVA (Bio-RESEARCH, Assoc., Inc., Milwaukee) wird die Interpretation der Vibrationen

zur Diagnosefindung mit „signifikanten“ Vibrationen dargelegt [158]. Innerhalb der Dissertation sollen die Vibrationswerte daher nicht den Anspruch erheben, zur Diagnosefindung herangezogen werden zu können.

JVA wird als schnelles und kostengünstiges Verfahren beschrieben, um Kiefergelenkgeräusche zu detektieren ([66] S.219). Eine noch präzisere Messung soll in Kombination mit dem Elektrognathographen erzielt werden [66]. Wie in vorausgehender Diskussion dargelegt ergeben sich durchaus Vorteile im Vergleich zur klinischen Untersuchung mit diesem Verfahren. Das Verfahren gestaltet sich dennoch apparativ aufwendig. Jegliche Störfaktoren, die auf die Geräte Einfluss nehmen könnten und zu einem verfälschten Messergebnis führen könnten, müssen eliminiert werden. Der eigentliche Messvorgang kann zwar in überschaubarem Zeitraum vollzogen werden. Die vergehende Zeit vom Anbringen der Apparaturen, der Instruktion des Patienten, des Messvorgangs an sich bis zum Abnehmen und Verstauen der Apparaturen stellt sich allerdings um ein vielfach länger dar. Die Praktikabilität des Verfahrens ist daher fraglich. Die Anschaffung der Geräte ist im Vergleich zur klinischen Untersuchung kostenintensiv, insbesondere im Falle der Anwendung in Kombination mit dem Elektrognathographen.

In aktueller Literaturrecherche konnte zwar eine Studie im Rahmen einer aktuellen Dissertationsschrift aus Deutschland gefunden werden, die Kiefergelenkvibrationen bei JIA-Patienten mittels JVA untersucht. Der Hersteller des Joint Vibration Analysis als technisches Gerät ist allerdings ein anderer (Zebris Medical GmbH) [121]. In Deutschland scheint das Verfahren der elektronisch-instrumentellen Registrierung von Kiefergelenkvibrationen daher bisher wenig verbreitet zu sein, wenngleich sich die Registrierung von Kiefergelenkgeräuschen mittels Funktionsstatus kostengünstiger und mit weniger apparativem Aufwand verifizieren lassen.

4.2 Diskussion der explorativen Untersuchung: Signifikanz der Messwerte zwischen JIA und NON-JIA- Probanden

Ein weiteres Ziel vorliegender Dissertation ist der Vergleich elektronisch aufgenommener Vibrationen der Kiefergelenke asymptotischer Probanden mit Kiefergelenkvibrationen von Patienten mit bestehender Diagnose der JIA und deren Untersuchung auf statistische Signifikanz.

Aufgrund der Tatsache, dass bei Kindern und Jugendlichen die Prävalenz der Kiefergelenkbeteiligung mit bis zu 87% sehr hoch ist [79] und die Betroffenen häufig Symptome zeigen wie unter anderem eine eingeschränkte Mundöffnung, Deviationen, Kiefergelenkreiben oder -Knacken [61, 64], sollte es möglich sein, diese Symptome mittels JVA und dem Elektrognathographen elektronisch zu registrieren und graphisch darzustellen. Jedoch sind Symptome bei einer Kiefergelenkbeteiligung nicht immer klinisch oder funktionell apparent [4, 74, 95, 140]. Koos et al. [74] zeigten in einer Studie durch eine KM-MRT, dass zum Teil hochgradige Destruktionen der Kiefergelenke bei betroffenen Kindern und Jugendlichen asymptotisch blieben. Da Kinder und Jugendliche mit JIA bei einer Kiefergelenkbeteiligung oftmals morphologisch veränderte Gelenkoberflächen der Kiefergelenke besitzen [1, 4, 13, 74, 140, 148], ist davon auszugehen, dass die Gelenke durch die Destruktion/Erosion bedingt keine glatten Gelenkflächen mehr besitzen. Bei der Artikulation der Gelenkflächen eines Kiefergelenks bei Gesunden entsteht zwar Reibung, jedoch keine merkliche Vibration oder ein Geräusch. Erst bei Gelenkveränderungen wie z.B. Degeneration, Perforation oder Verlagerung entsteht ein typisches merkliches Vibrationsmuster [125]. Folglich müssten in Anbetracht der hohen Prävalenz einer Kiefergelenkbeteiligung bei an JIA-Erkrankten und einer möglichen pathologischen Gelenkveränderung höhere Energien der Vibrationen bei der Gelenkartikulation detektiert werden können als bei gesunden Probanden, zumal in diversen Studien mittels elektronischer Registrierung bei Gelenkveränderungen höhere Energien detektiert wurden als bei gesunden

Gelenken [17, 36, 50, 93] und in Zusammenhang mit einer JIA Discusluxation und -erosion sowie in fortgeschrittenem Stadium Arthrose [149] beschrieben wurden.

In vorliegender Dissertation zeigen die Ergebnisse signifikant höhere Vibrationswerte der JIA-Gruppe in den Items „Total Integral“, „Integral<300Hz“, „Integral>300Hz“, „>300/ <300Hz Ratio“, „Med. Frequency“ und „Peak Amplitude“ links. Lediglich im Item „Peak Amplitude“ des rechten, sowie „Peak Frequency“ beider Kiefergelenke waren keine signifikanten Unterschiede zwischen gesunden und erkrankten Probanden festzustellen. Die Werte der JIA-Gruppe streuten deutlich mehr, außer im Item „Peak Frequency“. Ein möglicher Grund der vorwiegend größeren Streuung der Werte (größere Interquartilsabstände) der JIA-Probanden könnten interindividuelle Gelenkunterschiede beziehungsweise verschiedene Gelenkzustände bei unterschiedlich weit fortgeschrittener Kiefergelenkbeteiligungen darstellen.

4.2.1 Vergleich mit anderen Studien und Publikationen

In Studien konnte aufgezeigt werden, dass dysfunktionale oder entzündete Gelenke im Vergleich zu gesunden ebenfalls höhere Werte lieferten [17, 36, 50, 93]. Die signifikant höheren Werte der JIA-Patienten in den meisten Items könnten somit einen ersten Hinweis auf bereits eintretende oder vorhandene Gelenkgeschehen der JIA-Probanden geben. Welche Vibrationsmuster, Wellenformen und Frequenzen den entsprechenden Zuständen des Kiefergelenks zugeordnet werden können, wurde in weiteren Studien erforscht [59, 69, 93, 165]. Die einzelnen Studiendesigns zeigen sich vielfältig. Beispielsweis ermittelten Kondrat et al. [69] Vibrationswerte unterschiedlicher Dysfunktionen, welche der Einteilung nach Piper folgten. Oder es wurden Werte für Discusverlagerung mit Reposition einer gesunden Kontrollgruppe gegenübergestellt [51]. Garcia et al. [36] verglichen Vibrationswerte (dysfunktional) entzündlicher Kiefergelenke mit Werten gesunder Probanden zu verschiedenen Zeitpunkten der Unterkieferbewegung.

In vorliegender Dissertation wurden zwar vorwiegend signifikant höhere Werte der JIA-Probanden gemessen, die Unterschiede zwischen den Gruppen fallen allerdings in den meisten Items (vor allem in den Integral-assoziierten Items) milder aus als in anderen Studien, in welchen Vibrationswerte von dysfunktionalen Kiefergelenken mit gesunden verglichen wurden [93] [17]. Erklärbar könnten die milder ausfallenden Unterschiede mit der in der von Garcia et al. [36] beschriebenen möglichen Abnahme der Vibrationsenergie durch chronische Entzündung oder Gelenkerguss sein. Diese Hypothese verdeutlichte bereits der Autor einer Dissertationsschrift [121], in welcher Vibrationswerte schwer und leicht betroffener KG von JIA-Patienten anhand der Einteilung nach Billiau [10] gegenübergestellt wurden. Dort wurden in der Gruppe mit schwer betroffenen KG in den meisten Items zwar signifikant niedrigere Werte gemessen. Dies könnte dennoch die vergleichsweise „eher niedrigeren“ Werte der JIA-Probanden auch in vorliegender Dissertation erklären. Die Vibrationswerte aus dieser Studie können aufgrund differierender Einheiten zum Vergleich jedoch nicht herangezogen werden.

So wurden im Item „Total Integral“, welches die Gesamtenergie der Vibrationen widerspiegelt [42], in Studien mit dysfunktionalen Kiefergelenken (ohne entzündliche Komponente) deutlich höhere Werte gefunden [17, 49, 69] als in vorliegender Dissertation, in welcher der Median der JIA-Probanden bei 9,9 links und 7,05 rechts lag. Vergleichsweise lag der Median in der Studie von Kondrat et al. [69] bei Patienten mit Bandlaxität bei 32,6. Huang et al. [49] registrierten Werte von 19,92 im Median bei anteriorer Discusverlagerung mit Reposition. Garcia et al. [36] konnten Werte zwischen 8,5 und 57,61 im Mittel bei entzündeten Kiefergelenken registrieren. In der Non-JIA-Gruppe wurde 6,2 und 5,9 im Median im linken und rechten Kiefergelenk registriert. Huang et al. [49] konnten ähnliche Werte in der gesunden Kontrollgruppe mit 6,12 messen.

Im Item „Integral>300Hz“ liegt der Median der JIA-Probanden für das linke KG bei 2,1, für das rechte KG bei 1,5. Ähnliche Werte von 2,3 im Median wurden in der Studie von Kondrat et al. [69] bei Probanden mit Bandlaxität gefunden. Höhere Werte von 3,2 im Median registrierten Huang et al. [49] bei Patienten mit anteriorer Discusverlagerung mit Reposition oder Kondrat et al. [69] bei

Patienten mit Subluxation/Eminentia-Knacken. Dort wurden Werte von 4,9 im Median gemessen [69]. Der innerhalb der Dissertation registrierte Wert von 1,0 im Median bei den gesunden Probanden deckt sich mit einer anderen Studie, in welcher vergleichbare Werte für gesunde Probanden in diesem Item gefunden wurde [49].

Bei Werten $>6\text{N/m}^2$ im Item „Peak Amplitude“ wird die registrierte Vibration bzw. das Geräusch für den Probanden selbst hörbar [162]. Werte der JIA-Probanden im Median von 0,5 und 0,6 im rechten und linken KG verdeutlichen, dass die Probanden selbst die Geräusche nicht wahrnehmen konnten. Garcia et al. [36] registrierten bei entzündeten Kiefergelenken Werte von 0,35 bis 3,96 im Mittel. In Patienten mit Subluxation/Knacken konnten Kondrat et al. [70] Werte im Median von 16,2 messen, bei gesunden Werte von 1,1.

Im Item „Peak Frequency“ zeigen sich die registrierten Werte der JIA-Gruppe mit Medianen von 124,5Hz für das linke, und 118,5Hz für das rechte KG ähnlich den registrierten Werten der entzündeten KG in der Studie von Garcia et al. [36]. In der Gruppe der Non-JIA-Probanden konnten jedoch vergleichbare Werte gemessen werden. Der Unterschied zwischen den Gruppen war vorliegend nicht signifikant. Einzig in diesem Item war eine größere Streuung der Werte (größere Interquartilsabstände) der gesunden Probanden zu verzeichnen. Dies ist auch in der asymptomatischen Kontrollgruppe in der Studie von Garcia et al. [36] mit Werten von 56.8Hz und 132.6Hz im Mittel zu beobachten abhängig vom Vibrationszeitpunkt innerhalb der Unterkieferbewegung. Ursächlich in diesen variablen Werten aller Items innerhalb der gesunden Probanden sehen die Autoren die Registrierung des Synovialfluss während unterschiedlicher Mundöffnungs- und Mundschlussphasen.

Im Item „Integral<300Hz“ wurde 7,15 links und 5,75 rechts im Median innerhalb der JIA-Gruppe gemessen. Auch in diesem Item repräsentierten Studien mit Dysfunktionen höhere Werte von 10,15 (anteriore Discusverlagerung mit Reposition) [49] oder sogar 113,7 (Eminentia-Knacken) [69]. Entzündete Kiefergelenke zeigten Werte zwischen 5,7 und 48,64 im Mittel, abhängig vom Zeitpunkt der Vibration [36]. Die Non-JIA-Gruppe erzielte Werte von 5,1 und 4,9

links und rechts. Die gesunde Kontrollgruppe in der Studie von Huang et al. [49] zeigte ähnliche Werte von 4,83 im Median.

Im Item „>300/<300Hz Ratio“ der JIA-Gruppe konnte vorliegend ein Median von 0,29 für das linke, und 0,275 für das rechte KG ermittelt werden. Die Mediane liegen somit knapp unter dem Schwellenwert von 0,3, ab welchem degenerative Gelenkerkrankungen als wahrscheinlich gelten ([66] mit Verweis auf [164]). Somit könnten diese Werte einen Hinweis auf milde degenerative Zustände der JIA-Probanden geben.

Die einzelnen klinischen Befunde der JIA-Probanden sind nicht bekannt. In keiner der in 4.2.1 genannten Studien konnte in allen der Items vergleichbare Werte gefunden werden, die explizit auf einen bestimmten Zustand oder Dysfunktion passen würde. Die dennoch signifikant erhöhten Werte der JIA-Gruppe könnten jedoch auf eine Pathologie im Kiefergelenk hinweisen. Die vergleichsweise milder ausfallenden Werte gegenüber Werten, die bei einer spezifischen Dysfunktionen registriert wurden, könnten zum einen in einer von Garcia et al. [36] beschriebenen und von Riekert bekräftigten [121] möglichen Abnahme der Vibrationsenergie durch chronische Entzündung oder Gelenkerguss erklärbar sein. Zum anderen wurden die Werte sehr wahrscheinlich durch die Auswahl nicht signifikanter Vibrationen innerhalb der Dissertation beeinflusst. Zudem muss mit einer „Durchmischung“ verschiedener Zustände oder sogar nicht betroffener KG innerhalb der JIA-Gruppe gerechnet werden, was die größere Streuung der meisten Items erklären könnte. Um Aufschluss über den genauen Status der Kiefergelenke der JIA-Probanden zu erhalten, müssten daher die Vibrationen und die sich daraus ergebenden Frequenzmuster für jeden einzelnen JIA-Probanden interpretiert und analysiert werden.

Eine Optimierung der Diagnosefindung sollte durch Berücksichtigung der Daten erzielt werden, die innerhalb dieser Dissertation keine Berücksichtigung fanden, welche aber in Zusammenhang mit dem Elektrognathographen erfassbar sind. Diese sind die elektronische Registrierung der maximalen Mundöffnung, der Unterkieferbewegungsgeschwindigkeit, und die Registrierung der Seitenabweichung des Unterkiefers. Einige Autoren befassten sich damit, wie verlässlich solche klinischen Symptome eine Kiefergelenkarthritis anzeigen [73, 107]. In

der Studie von Koos et al. [73] zeigten sich dabei die Erfassung der maximalen Mundöffnung, gefolgt von Kiefergelenkgeräuschen, als die am wenigsten sensitiven Items. Da klinische Symptome folglich keine verlässlichen Indikatoren zur Verifizierung einer Kiefergelenkarthritis sind, sollte eine Komplettierung der Diagnosefindung daher durch eine Bildgebung erfolgen [73, 78]. Wie bereits erwähnt stellt hier das KM-MRT den Goldstandard dar [95], gerade weil es Entzündungen im Frühstadium darstellen kann [78].

Andere Autoren befassten sich mit der elektronischen Detektion von Kiefergelenkvibrationen asymptomatischer Probanden [58, 102, 138, 139], wohingegen sich wenig Studien mit der elektronischen Detektion von Kiefergelenkvibrationen für entzündlich veränderte Gelenke befassten [36, 105]. Darunter interpretierte Owen [105] verschiedene Wellenformen, die für unterschiedliche Zustände des Kiefergelenks pathognomonisch sind und konnte Vibrationsmuster unter anderem für entzündlich veränderte Gelenke ausmachen. Beim entzündeten Kiefergelenk, erklärbar durch einen Gelenkerguss, zeigt sich im Frequenzspektrum bei circa 25 Hertz eine kleine Spitze. Diese Frequenz entzieht sich allerdings dem menschlichen Gehör, kann aber durch JVA detektiert werden. Owen beschreibt den Hauptvorteil des JVA unter anderem in der Möglichkeit, solche Entzündungen frühzeitig zu verifizieren, wobei in seinem Artikel eine solche Entzündung als „Vorstufe“ anderer (nicht explizit durch JIA bedingten) Dysfunktionen beschrieben wird [105].

Genau in der durch alleinige klinische Untersuchung frühzeitigen Detektion einer solchen durch JIA induzierten Entzündung sehen Küssler et al. [78] die Schwierigkeit bei JIA-Patienten, da gerade dieses Stadium nahezu symptomlos verlaufen kann.

Im Hinblick darauf, dass an JIA erkrankte Kinder und Jugendliche oftmals asymptomatische Verläufe zeigen [74, 95] und Kiefergelenkbeteiligungen oftmals zu spät erkannt werden [95], könnte sich die elektronische Aufzeichnung folglich als objektive und noninvasive Methode ([66] herauskristalisieren, die frühzeitig und ohne Strahlenbelastung [60] bei Kindern und Jugendlichen mit JIA zur Detektion und Interpretation von

Kiefergelenkvibrationen eingesetzt werden könnte, sogar (wie von Owen beschrieben) um frühe Entzündungen zu verifizieren [105]. Diesbezüglich limitierend könnte sich allerdings die von Stoustrup et al. [135] dargelegte Schwierigkeit darstellen, die aus einer CMD resultierenden Entzündung des Kiefergelenks von Entzündungen, die aus einer JIA resultieren, abzugrenzen, wenngleich die Symptome einer CMD und Arthritis sich ähneln.

4.2.2 Schlussfolgerung für den Vergleich zwischen JIA/Non-JIA

Weitere Studien sollten daher stattfinden, um die Reliabilität und Validität des Joint Vibration Analysis in der frühzeitigen Detektion einer Kiefergelenkbeteiligung bei Kindern und Jugendlichen mit JIA zu bestätigen. Hier wäre ein möglicher Ansatz, detektierte Kiefergelenkvibrationen und Wellenmuster von Kindern bei bekannter JIA mit gesunden und auch CMD-Patienten zu vergleichen, und als Referenz mit bildgebenden Befunden im Sinne einer Gd-KM-MRT damit zu korrelieren. Hierbei sollte jedoch einer Studie Aufmerksamkeit geschenkt werden, in welcher beim KM-MRT eine Kontrastanhebung im Gelenk auch bei Kindern ohne Kiefergelenkarthritis festzustellen war [151]. Im Falle reliabler und valider Ergebnisse, auch für asymptomatische Patienten mit JIA, könnte JVA als geeignetes Screeningverfahren für eine in der Literatur geforderte, regelmäßige gelenkspezifisch, -kieferorthopädische Untersuchung [95] fungieren, um den Zustand der Kiefergelenke zu ermitteln und daraus Therapieansätze anpassen und optimieren zu können, und sogar um frühe Entzündungen zu detektieren.

Mit Daten aus Joint Vibration Analysis und des Elektrognathographen (der Firma Bioresearch Ass. Inc.) in Verbindung mit einem KM-MRT könnte dem Untersuchenden neben der klinischen Untersuchung eine ergänzende Befunderhebung und Diagnosefindung zur frühzeitigen Detektion einer Kiefergelenkbeteiligung bei Kindern mit JIA zur Verfügung stehen, insofern zum Beispiel der Fragebogen der euroTMjoint sowie die kraniofaziale Morphologie und das Wachstumsmuster der Patienten berücksichtigt werden.

4.2.3 Limitationen für den Vergleich zwischen JIA/NON-JIA

Ob und wie viele Patienten der JIA-Gruppe tatsächlich morphologisch veränderte oder dysfunktionale Gelenke aufwiesen ist nicht vorliegend. In Anbetracht der hohen Prävalenz einer KG-Beteiligung bei JIA und aufgrund der Tatsache, dass diese Patienten in der Abteilung für Kieferorthopädie der Universität Tübingen vorstellig wurden, lässt jedoch darauf schließen, dass tatsächlich Auffälligkeiten bei diesem Patientenkollektiv im stomatognathen System bestanden und die signifikant höheren Vibrationswerte der meisten Items mit Hinweis auf mögliche pathologische oder entzündlichen Zustände der Kiefergelenke nicht zufallsbedingt zustande kamen.

5. Zusammenfassung

Primäres Ziel vorliegender Dissertation war eine Methodenprüfung des Joint Vibration Analysis [158], einem elektronisch-instrumentellen Verfahren zur Registrierung und Quantifizierung von Kiefergelenkgeräuschen beziehungsweise vom Kiefergelenk emittierter Vibrationen. Vibrationen werden mit diesem Verfahren dabei dargelegt als Werte amplituden-, integral- und frequenzassoziierter Items, aus welchen sich jeweils unterschiedliche Zustände und Dysfunktionen des Kiefergelenks ableiten lassen. Grundlage bildeten vier Messwiederholungen, wobei innerhalb einer Messung wiederum vier Vibrationen als Werte von 31 für CMD asymptomatischer Probanden in die statistische Auswertung mit einbezogen wurden. Die untersuchten sieben Items mit entsprechenden Werten jeweils für das rechte und linke Kiefergelenk (demgemäß 14) waren: „Integral<300Hz“, „Integral>300Hz“, „Total Integral“, „>300/<300Hz Ratio“, „Peak Amplitude“, „Peak Frequency“, „Med. Frequency“.

Die statistische Auswertung der Methodenprüfung umfasste die Errechnung der Variationskoeffizienten zur Bestimmung der Messvariabilität (Präzision der Messung), sowie die Ermittlung der Intraklassenkorrelationen (ICC) zur Bestimmung der Reliabilität bei Messwiederholungen. Es erfolgte eine Bewertung der Ergebnisse anhand dafür spezifischer Bewertungssysteme.

Die Variationskoeffizienten reichten im Median von 13% als bestes Ergebnis im Item „Med Frequency li“ (Bewertungsstufe ausreichend), bis 63% im Item „Peak Frequency“ (Bewertungsstufe inakzeptabel). Die Bewertungsstufe ausreichend konnte in zehn der Items vergeben werden („Total Integral li“, „Integral <300Hz li und re“, „Integral>300Hz re“, >300/300Hz Ratio li und re“, Peak Amplitude li und re“, „Med requency li und re“. Als grenzwertig akzeptabel zeigte sich die Messvariabilität in zwei der Items („Total Integral re“ sowie „Integral>300Hz li“). Demzufolge liegen die errechneten Ergebnisse (mit Ausnahmen) überwiegend in der Bewertungsstufe ausreichend (zweitbeste Bewertungsstufe).

Die Intraklassenkorrelationen reichten von 0,30 („mangelhaft“ im Item „Peak Frequency re“) bis 0,75 („ausgezeichnet“ im Item „Total Integral li“). Sieben der Items erreichten die Bewertungsstufe „mittelmäßig“ („Integral>300Hz re“,

„>300/<300Hz Ratio re“, Peak Amplitude li und re“, „Peak Frequency li“, „Med. Frequency li und re“). Vier der Items ließen sich der Bewertungsstufe „gut“ zuordnen („Total Integral re“, „Integral<300Hz li“, „Integral>300Hz li“). Demgemäß sind die Ergebnisse (mit Ausnahmen) den Bewertungsstufen mittelmäßig bis gut zuzuordnen, das heißt, die Vibrationen lassen sich (mit Ausnahmen) mittelmäßig bis gut reproduzieren.

Insgesamt zeigten sowohl die Messvariabilität als auch die Reproduzierbarkeit innerhalb der integral-assoziierten Items bessere Ergebnisse. Weitere Studien mit größeren Fallzahlen sollten stattfinden, um den Einfluss intraindividuelle Schwankungen anatomischer Strukturen des Kiefergelenks wie zum Beispiel des Synovialfluss auf die Messvariabilität und Reproduzierbarkeit der Vibrationen zu untersuchen.

Als weiteres Ziel wurden im Rahmen einer explorativen Untersuchung Werte der Items desselben Patientenkollektivs mit entsprechenden Werten von 22 Probanden, die an einer juvenilen idiopathischen Arthritis erkrankt sind, auf signifikante Unterschiede überprüft. In den untersuchten sieben Items, von denen jeweils Werte für das rechte und linke Kiefergelenk bestimmt wurden, konnten in 11 der Items signifikante Unterschiede festgestellt werden. In diesen 11 Items waren die Werte der Probanden mit juveniler idiopathischer Arthritis signifikant höher. Höhere Werte können auf intraartikuläre Störungen, Dysfunktionen oder Entzündungen hindeuten. Ob tatsächlich eine Kiefergelenkbeteiligung bei diesem Patientenkollektiv vorlag, ist nicht bekannt, mit diesem Ergebnis aber wahrscheinlich.

Weitere Studien mit höheren Fallzahlen wären notwendig, um die Reliabilität und Validität des JVA speziell für dieses Patientenkollektiv zu bestimmen, insbesondere um einen potentiellen Einsatz zur frühzeitigen Detektion einer Kiefergelenkbeteiligung bei JIA zu ermöglichen.

6. Literaturverzeichnis

1. Abramowicz S, Cheon JE, et al. Magnetic resonance imaging of temporomandibular joints in children with arthritis. *J Oral Maxillofac Surg.* 2011; 69(9):2321-8.
2. Agerberg G, Bergenholtz A. Craniomandibular disorders in adult populations of West Bothnia, Sweden. *Acta Odontol Scand.* 1989; 47(3):129-40.
3. Ahlers MO, Jakstat HA. Identifikation funktionsgestörter Patienten. *Zahnmedizin up2date.* 2008; 2(02):143-55.
4. Arabshahi B, Cron RQ. Temporomandibular joint arthritis in juvenile idiopathic arthritis: the forgotten joint. *Curr Opin Rheumatol.* 2006; 18(5):490-5.
5. Arabshahi B, Dewitt EM, et al. Utility of corticosteroid injection for temporomandibular arthritis in children with juvenile idiopathic arthritis. *Arthritis Rheum.* 2005; 52(11):3563-9.
6. Barrentine LB. Concepts for Repeatability&Reproducibility Studies, Milwaukee, WI.: ASQC Quality Press; 1991.
7. Bechtold TE, Magunia IM, et al. Juvenile idiopathische Arthritis (JIA) und das Kiefergelenk—Ein Update. *Inf Orthod Kieferorthop.* 2017; 49(03):193-7.
8. Berg BI, Haßfeld S, et al. Bildgebende Diagnostik bei Patienten mit kraniomandibulärer Dysfunktion. *Der MKG-Chirurg.* 2016; 9(3):176-83.
9. Bhatt KH, Karjodkar FR, et al. Juvenile idiopathic arthritis. *Contemp Clin Dent.* 2014; 5(1):89-91.
10. Billiau AD, Hu Y, et al. Temporomandibular joint arthritis in juvenile idiopathic arthritis: prevalence, clinical and radiological signs, and relation to dentofacial morphology. *J Rheumatol.* 2007; 34(9):1925-33.
11. Briechle S. Elektronische, dreidimensionale Messung und Registrierung von Unterkiefergrenzbewegungen- Methodenüberprüfung und Messgenauigkeitsanalyse des JT-3D-Systems (BioPAK): Dissertationsschrift Universität Tübingen; 2012.
12. Bumann A, Lotzmann U. Band 12: Funktionsdiagnostik und Therapieprinzipien: Georg Thieme Verlag; 1999.
13. Campos MI, Campos PS, et al. Analysis of magnetic resonance imaging characteristics and pain in temporomandibular joints with and without degenerative changes of the condyle. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2008; 37(6):529-34.
14. Christensen LV. Physics and the sounds produced by the temporomandibular joints. Part I. *J Oral Rehabil.* 1992; 19(5):471-83.
15. Christensen LV. Physics and the sounds produced by the temporomandibular joints. Part II. *J Oral Rehabil.* 1992; 19(6):615-27.
16. Christensen LV, Donegan SJ, et al. Temporomandibular joint vibration analysis in a sample of non-patients. *Cranio.* 1992; 10(1):35-41; discussion -2.
17. Christensen LV, Orloff J. Reproducibility of temporomandibular joint vibrations (electrovibratography). *J Oral Rehabil.* 1992; 19(3):253-63.
18. Cicchetti DV. Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments in psychology. *Psychol Assess.* 1994; 6(4):284.

-
19. Dawson D, Longfield, MD, Wright, V., and Buckley, T. Behavior of the Synovial Fluid on Articular Cartilage. *Ann of the Rheum Dis.* 1969.
 20. Delp MH, Manning RT. *Major's physical diagnosis*: WB Saunders; 1968.
 21. Deng M, Long X, et al. Electrosonographic characteristics of sounds from temporomandibular joint disc replacement. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2006; 35(5):456-60.
 22. DIN. Deutsches Institut für Normungen e.V. *DIN Taschenbuch 223: Qualitätsmanagement und Statistik-Begriffe*: TÜV-Verlag; 1995.
 23. Droter JR. An orthopaedic approach to the diagnosis and treatment of disorders of the temporomandibular joint. *Dent Today.* 2005; 24(11):82, 4-8; quiz 8.
 24. Drum R, Litt M. Spectral analysis of temporomandibular joint sounds. *J Prosthet Dent.* 1987; 58(4):485-94.
 25. Dueckers G, Guellac N, et al. *Interdisziplinäre S2-Therapieleitlinie der Juvenilen Idiopathischen Arthritis (2. Auflage)*. *Klin Padiatr.* 2011; 223(06):386-94.
 26. Durrani S BR, Lalithadevi P, Munireddy S, Priya P. Joint Vibration Analysis of Temporomandibular Joint in asymptomatic patients in the age group between 18-25 years: an in vivo Study.; Available from: http://www.ijocrweb.com/pdf/2015/January-March/9218_Original_Article.pdf [Zugriff 16.10.2019].
 27. Dworkin SF. Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders: current status & future relevance¹. *J Oral Rehabil.* 2010; 37(10):734-43.
 28. Dworkin SF, LeResche L. Research diagnostic criteria for temporomandibular disorders: review, criteria, examinations and specifications, critique. *J Craniomandib Disord.* 1992; 6(4):301-55.
 29. Elfving L, Helkimo M, et al. Prevalence of different temporomandibular joint sounds, with emphasis on disc-displacement, in patients with temporomandibular disorders and controls. *Swed Dent J.* 2001; 26(1):9-19.
 30. Elfving L, Helkimo M, et al. Prevalence of different temporomandibular joint sounds, with emphasis on disc-displacement, in patients with temporomandibular disorders and controls. *Swed Dent J.* 2002; 26(1):9-19.
 31. Farrar WB. Characteristics of the condylar path in internal derangements of the TMJ. *J Prosthet Dent.* 1978; 39(3):319-23.
 32. Feteih RM. Signs and symptoms of temporomandibular disorders and oral parafunctions in urban Saudi Arabian adolescents: a research report. *Head Face Med.* 2006; 2:25.
 33. Fink CW. Proposal for the development of classification criteria for idiopathic arthritides of childhood. *J Rheumatol.* 1995; 22(8):1566-9.
 34. Freesmeyer WB. Was man vom Kiefergelenk des Menschen wissen sollte Teil II: Erkrankungen der Kiefergelenke (Arthropathien). *Manuelle Medizin.* 2001; 39(2):79-85.
 35. Gage JP. Collagen biosynthesis related to temporomandibular joint clicking in childhood. *J Prosthet Dent.* 1985; 53(5):714-7.
 36. Garcia AR, Madeira MC, et al. Joint vibration analysis in patients with articular inflammation. *Cranio.* 2000; 18(4):272-9.

-
37. Gay T, Bertolami CN. The acoustical characteristics of the normal temporomandibular joint. *J Dent Res.* 1988; 67(1):56-60.
 38. Gesch D, Bernhardt O, et al. Prevalence of signs and symptoms of temporomandibular disorders in an urban and rural German population: results of a population-based Study of Health in Pomerania. *Quintessence Int.* 2004; 35(2):143-50.
 39. Gnauck M, Helkimo M. Untersuchung und Behandlung von Patienten mit Funktionsbeschwerden im Kausystem—ein skandinavisches Modell. *Zahnmedizin up2date.* 2012; 6(04):347-73.
 40. Gönner-Özkan V, Meyer P, et al. Interdisziplinäre Therapie der Kiefergelenkentzündung bei Kindern mit juveniler idiopathischer Arthritis. *Z Rheumatol.* 2010; 69(2):130-4.
 41. Gorska A, Przystupa W, et al. Temporomandibular joint dysfunction and disorders in the development of the mandible in patients with juvenile idiopathic arthritis - preliminary study. *Adv Clin Exp Med.* 2014; 23(5):797-804.
 42. Gupta B, Thumati P, et al. Temporomandibular joint vibrations from totally asymptomatic subjects. *Cranio.* 2016; 34(3):169-75.
 43. Hartung J, Elpelt B, et al. Statistik: Lehr-und Handbuch der angewandten Statistik. 14. ed: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH München; 2005.
 44. Heffez L, Blaustein D. Advances in sonography of the temporomandibular joint. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1986; 62(5):486-95.
 45. Helenius LM, Tervahartiala P, et al. Clinical, radiographic and MRI findings of the temporomandibular joint in patients with different rheumatic diseases. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2006; 35(11):983-9.
 46. Hirsch C, Hoffmann J, et al. Are temporomandibular disorder symptoms and diagnoses associated with pubertal development in adolescents? An epidemiological study. *J Orofac Orthop.* 2012; 73(1):6-8, 10-8.
 47. Hirsch C, John M. Prävalenz kranio-mandibulärer Dysfunktionen (CMD) bei Kindern und Jugendlichen: Teil 2: Nicht-schmerzhaft Befunde. *Dtsch Zahnärztl Z.* 2003; 58(11):629-32.
 48. Honda K, Natsumi Y, et al. Correlation between MRI evidence of degenerative condylar surface changes, induction of articular disc displacement and pathological joint sounds in the temporomandibular joint. *Gerodontology.* 2008; 25(4):251-7.
 49. Huang ZS, Lin XF, et al. Characteristics of temporomandibular joint vibrations in anterior disk displacement with reduction in adults. *Cranio.* 2011; 29(4):276-83.
 50. Hutta JL, Morris TW, et al. Separation of internal derangements of the temporomandibular joint using sound analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1987; 63(2):151-7.
 51. Hwang IT, Jung DU, et al. Evaluation of TMJ sound on the subject with TMJ disorder by Joint Vibration Analysis. *J Adv Prosthodont.* 2009; 1(1):26-30.
 52. Inglehart MR, Patel MH, et al. Self-reported temporomandibular joint disorder symptoms, oral health, and quality of life of children in kindergarten through grade 5: Do sex, race, and socioeconomic background matter? *J Am Dent Assoc.* 2016; 147(2):131-41.

-
53. Isberg-Holm AM, Westesson PL. Movement of disc and condyle in temporomandibular joints with clicking. An arthrographic and cineradiographic study on autopsy specimens. *Acta Odontol Scand.* 1982; 40(3):151-64.
54. Ishigaki S, Bessette RW, et al. The distribution of internal derangement in patients with temporomandibular joint dysfunction--prevalence, diagnosis, and treatments. *Cranio.* 1992; 10(4):289-96.
55. Ishigaki S, Bessette RW, et al. A clinical study of temporomandibular joint (TMJ) vibrations in TMJ dysfunction patients. *Cranio.* 1993; 11(1):7-13; discussion 4.
56. Ishigaki S, Bessette RW, et al. Vibration analysis of the temporomandibular joints with degenerative joint disease. *Cranio.* 1993; 11(4):276-83.
57. Ishigaki S, Bessette RW, et al. Vibration analysis of the temporomandibular joints with meniscal displacement with and without reduction. *Cranio.* 1993; 11(3):192-201.
58. Ishigaki S, Bessette RW, et al. Vibration of the temporomandibular joints with normal radiographic imagings: comparison between asymptomatic volunteers and symptomatic patients. *Cranio.* 1993; 11(2):88-94.
59. Ishigaki S, Bessette RW, et al. Vibration analysis of the temporomandibular joints with meniscal displacement with and without reduction. *Cranio.* 2016; 11(3):192-201.
60. Ishigaki S, Bessette RW, et al. Diagnostic accuracy of TMJ vibration analysis for internal derangement and/or degenerative joint disease. *Cranio.* 1994; 12(4):241-6.
61. Jank S, Schröder D, et al. Kiefergelenkbeschwerden bei juvenilen Patienten mit rheumatischen Erkrankungen. *Mund Kiefer Gesichtschir.* 2003; 7(4):214-9.
62. John MT, Dworkin SF, et al. Reliability of clinical temporomandibular disorder diagnoses. *Pain.* 2005; 118(1):61-9.
63. John MT, Hirsch C, et al. Translating the research diagnostic criteria for temporomandibular disorders into German: evaluation of content and process. *J Orofac Pain.* 2006; 20(1).
64. Kahl-Nieke B. The Forgotten Joint--Das Kiefergelenk bei Juveniler Idiopathischer Arthritis (JIA). *Inf Orthodont Kieferorthop.* 2013; 45(04):221-6.
65. Katzberg RW, Dolwick MF, et al. Arthrotomography of the temporomandibular joint. *AJR Am J Roentgenol.* 1980; 134(5):995-1003.
66. Kerstein RB. *Handbook of Research on Computerized Occlusal Analysis Technology Applications in Dental Medicine.* 1 ed: IGI Global; 2014: 215-68.
67. Kjellberg H. Juvenile chronic arthritis. Dentofacial morphology, growth, mandibular function and orthodontic treatment. *Swed Dent J Suppl.* 1995; 109:1-56.
68. Kochendörfer MC. Oberflächen-elektromyographische Analyse der Kaumuskulatur mittels BioEMG, Messanalyse und Methodenprüfung. *Dissertationsschrift Universität Tübingen.* 2014.
69. Kondrat W, Sierpinska T, et al. Assessment of the Temporomandibular Joint Function in Young Adults without Complaints from the Masticatory System. *Int J Med Sci.* 2018; 15(2):161-9.

-
70. Kondrat W, Sierpińska T, et al. Assessment of the Temporomandibular Joint Function in Young Adults without Complaints from the Masticatory System. *Int J Med Sci.* 2018; 15(2):161-9.
 71. Könönen M, Waltimo A, et al. Does clicking in adolescence lead to painful temporomandibular joint locking? *The Lancet.* 1996; 347(9008):1080-1.
 72. Koo TK, Li MY. A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *J Chiropr Med.* 2016; 15(2):155-63.
 73. Koos B, Twilt M, et al. Reliability of clinical symptoms in diagnosing temporomandibular joint arthritis in juvenile idiopathic arthritis. *J Rheumatol.* 2014; 41(9):1871-7.
 74. Koos B, Tzaribachev N, et al. Classification of temporomandibular joint erosion, arthritis, and inflammation in patients with juvenile idiopathic arthritis. *J Orofac Orthop.* 2013; 74(6):506-19.
 75. Kopp S. Subjective symptoms in temporomandibular joint osteoarthritis. *Acta Odontol Scand.* 1977; 35(4):207-15.
 76. Kopp S, Hirsch H, et al. Funktionsbefunde im kranio-mandibulären System (CMS) bei Kindern im Alter von 5–9 Jahren. *Manuelle Medizin.* 40(5):297-305.
 77. Kristensen KD, Stoustrup P, et al. Clinical predictors of temporomandibular joint arthritis in juvenile idiopathic arthritis: A systematic literature review. *Semin Arthritis Rheum.* 2016; 45(6):717-32.
 78. Kuseler A, Pedersen TK, et al. A 2 year followup study of enhanced magnetic resonance imaging and clinical examination of the temporomandibular joint in children with juvenile idiopathic arthritis. *J Rheumatol.* 2005; 32(1):162-9.
 79. Kuseler A, Pedersen TK, et al. Contrast enhanced magnetic resonance imaging as a method to diagnose early inflammatory changes in the temporomandibular joint in children with juvenile chronic arthritis. *J Rheumatol.* 1998; 25(7):1406-12.
 80. Lanz W. Discitis mandibularis. *Zentralbl Chir.* 1909; 36:289-94.
 81. Larheim TA, Dale K, et al. Radiographic abnormalities of the temporomandibular joint in children with juvenile rheumatoid arthritis. *Acta Radiologica Diagnosis.* 1981; 22(3A):277-84.
 82. List T, Dworkin SF. Comparing TMD diagnoses and clinical findings at Swedish and US TMD centers using research diagnostic criteria for temporomandibular disorders. *J Orofac Pain.* 1996; 10(3).
 83. Loh A SD, Kriston L, Härter M. Richtlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen. *Dtsch Arztebl.* 2014; (Heft 38):3.
 84. Look JO, John MT, et al. Research diagnostic criteria for temporomandibular disorders: Reliability of Axis I diagnoses and selected clinical measures. *J Orofac Pain.* 2010; 24(1):25.
 85. Look JO, Schiffman EL, et al. Reliability and validity of Axis I of the Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders (RDC/TMD) with proposed revisions. *J Oral Rehabil.* 2010; 37(10):744-59.
 86. Magnusson T, Egermark I, et al. A longitudinal epidemiologic study of signs and symptoms of temporomandibular disorders from 15 to 35 years of age. *J Orofac Pain.* 2000; 14(4):310-9.

-
87. Magnusson T, Egermark I, et al. A longitudinal epidemiologic study of signs and symptoms of temporomandibular disorders from 15 to 35 years of age. *J Orofac Pain*. 2000; 14(4).
 88. Manfredini D, Guarda-Nardini L. Agreement between Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders and magnetic resonance diagnoses of temporomandibular disc displacement in a patient population. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2008; 37(7):612-6.
 89. Mann HB, Whitney DR. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The annals of mathematical statistics*. 1947:50-60.
 90. Manners PJ, Bower C. Worldwide prevalence of juvenile arthritis why does it vary so much? *J Rheumatol*. 2002; 29(7):1520-30.
 91. Martus P. Vorlesungsskript; Prüfung auf Normalverteilung. Institut für klinische und angewandte Biometrie, Universität Tübingen 2019.
 92. Matsuka Y, Yatani H, et al. Temporomandibular disorders in the adult population of Okayama City, Japan. *Cranio*. 1996; 14(2):158-62.
 93. Mazzetto MO, Hotta TH, et al. Characteristics of TMD noise analyzed by electrovibratography. *Cranio*. 2008; 26(3):222-8.
 94. Mericle PM, Wilson VK, et al. Effects of polyarticular and pauciarticular onset juvenile rheumatoid arthritis on facial and mandibular growth. *J Rheumatol*. 1996; 23(1):159-65.
 95. Meyer K, Foeldvari I, et al. Das Kiefergelenk bei juveniler idiopathischer Arthritis. *ZWR-Das Deutsche Zahnärzteblatt*. 2003; 112(03):64-74.
 96. Mike T. John UoL, Germany, Christian Hirsch MLUH-W, Germany. Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders, German Version. Available from: <https://ubwp.buffalo.edu/rdc-tmdinternational/wp-content/uploads/sites/58/2017/01/RDC-German.pdf>, [Zugriff 18.04.2020].
 97. Minden K, Niewerth M. Juvenile idiopathic arthritis – clinical subgroups and classification. *Z Rheumatol*. 2008; 67(2):100-10.
 98. Muller L, Kellenberger CJ, et al. Early diagnosis of temporomandibular joint involvement in juvenile idiopathic arthritis: a pilot study comparing clinical examination and ultrasound to magnetic resonance imaging. *Rheumatology (Oxford)*. 2009; 48(6):680-5.
 99. Neff A. Arthroskopie des Kiefergelenks. *Endoskopische Verfahren in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie essentials*: Springer, Wiesbaden; 2015: 13-19.
 100. Ogutcen-Toller M. Sound analysis of temporomandibular joint internal derangements with phonographic recordings. *J Prosthet Dent*. 2003; 89(3):311-8.
 101. Okeson JP. *Management of Temporomandibular Disorders and Occlusion*. 7 ed: Elsevier 2013.
 102. Olivieri KA, Garcia AR, et al. Joint vibrations analysis in asymptomatic volunteers and symptomatic patients. *Cranio*. 1999; 17(3):176-83.
 103. Oommen PT, Huppertz HI. Handlungsempfehlung nach der Leitlinie Therapie der Juvenilen idiopathischen Arthritis. *Monatsschr Kinderheilkd*. 2013; 161(1):60-2.
 104. Ottil P, Ahlers, et al. Klinischer Funktionsstatus der Deutschen Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und -therapie (DGFD) in der DGZMK. Available from:

http://www.dgzmk.de/uploads/media/Klinischer_Funktionsstatus.pdf [Zugriff 18.10.2019].

105. Owen lii AH. Rationale and utilization of temporomandibular joint vibration analysis in an orthopedic practice. *Cranio*. 1996; 14(2):139-53.

106. Paesani D, Westesson P-L, et al. Accuracy of clinical diagnosis for TMJ internal derangement and arthrosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1992; 73(3):360-3.

107. Pedersen TK, Kuseler A, et al. A prospective study of magnetic resonance and radiographic imaging in relation to symptoms and clinical findings of the temporomandibular joint in children with juvenile idiopathic arthritis. *J Rheumatol*. 2008; 35(8):1668-75.

108. Petty RE, Southwood TR, et al. Revision of the Proposed Classification Criteria for childhood. 1995; 22:1566-9.

109. Petty RE, Southwood TR, et al. International League of Associations for Rheumatology classification of juvenile idiopathic arthritis: second revision, Edmonton, 2001. *J Rheumatol*. 2004; 31(2):390-2.

110. Pollmann L. Sounds produced by the mandibular joint in a sample of healthy workers. *J Orofac Pain*. 1993; 7(4):359-61.

111. Poveda Roda R, Bagán JV, et al. Review of temporomandibular joint pathology: Part I: Classification, epidemiology and risk factors. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal (Internet)*. 2007; 12(4):292-8.

112. Prinz JF. Physical mechanisms involved in the genesis of temporomandibular joint sounds. *J Oral Rehabil*. 1998; 25(9):706-14.

113. Prinz JF. Subjective assessment of temporomandibular joint sounds. *J Oral Rehabil*. 1998; 25(10):765-9.

114. Prinz JFN, K.W. Classification of TMJ sounds. *Arch Oral Biol*. 1997; 41(631).

115. Radke JC, Kull RS. Distribution of temporomandibular joint vibration transfer to the opposite side. *Cranio*. 2012; 30(3):194-200.

116. Radke JC, Kull RS. Comparison of TMJ vibration frequencies under different joint conditions. *Cranio*. 2015; 33(3):174-82.

117. Rammelsberg P, Pospiech PR, et al. Variability of disk position in asymptomatic volunteers and patients with internal derangements of the TMJ. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 1997; 83(3):393-9.

118. Reißmann DR, John MT. Is temporomandibular joint (TMJ) clicking a risk factor for pain in the affected TMJ? *Der Schmerz*. 21(2):131-8.

119. Reißmann DR, John MT. Ist Kiefergelenkknacken ein Risikofaktor für Schmerzen im Kiefergelenk? *Der Schmerz*. 2007; 21(2):131-8.

120. Reissmann DR, John MT, et al. Eine Kurzversion der RDC/TMD. *Der Schmerz*. 2009; 23(6):618.

121. Riekert M. Wertigkeit klinischer, instrumenteller und bildgebender Untersuchungsverfahren der Kiefergelenksdiagnostik bei Patienten mit juveniler idiopathischer Arthritis: Dissertationsschrift Universität Würzburg; 2018, URN: urn:nbn:de:bvb:20-opus-163762, URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:20-opus-163762> [Zugriff 20.10.2019].

122. Ringold S, Torgerson TR, et al. Intraarticular corticosteroid injections of the temporomandibular joint in juvenile idiopathic arthritis. *J Rheumatol*. 2008; 35(6):1157-64.

-
123. Roberts CA, Tallents RH, et al. Clinical and arthrographic evaluation of temporomandibular joint sounds. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1986; 62(4):373-6.
124. Rohlin M, Westesson PL, et al. The correlation of temporomandibular joint sounds with joint morphology in fifty-five autopsy specimens. *J Oral Maxillofac Surg.* 1985; 43(3):194-200.
125. Rondeau B, Johnson D, et al. An Introduction to Joint Vibration Analysis (JVA), Part I. 2005; Available from: <http://www.dentalcareuniverse.com/index.php?ITEM=20690> [Zugriff 19.10.2019].
126. Sano T, Widmalm SE, et al. Amplitude and frequency spectrum of temporomandibular joint sounds from subjects with and without other signs/symptoms of temporomandibular disorders. *J Oral Rehabil.* 1999; 26(2):145-50.
127. Schiffman E, Ohrbach R, et al. Diagnostic criteria for temporomandibular disorders (DC/TMD) for clinical and research applications: recommendations of the International RDC/TMD Consortium Network and Orofacial Pain Special Interest Group. *J Oral Facial Pain Headache.* 2014; 28(1):6.
128. Schmitter M, Ohlmann B, et al. Research diagnostic criteria for temporomandibular disorders: a calibration and reliability study. *Cranio.* 2005; 23(3):212-8.
129. Schmitter M, Rammelsberg P, et al. The prevalence of signs and symptoms of temporomandibular disorders in very old subjects. *J Oral Rehabil.* 2005; 32(7):467-73.
130. Schwenzer N, Ehrenfeld M. *Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie.* 4. ed: Georg Thieme Verlag Stuttgart New York; 2010: 44-6.
131. Seneadza V, Balke Z, et al. Prevalence of arthrogenic temporomandibular disorders in the elderly Prävalenz von kranio-mandibulären kiefergelenkspezifischen Dysfunktionen bei älteren Menschen. *Zeitschrift für Kranio-mandibuläre Funktion.* 2010; 2(3):205-15.
132. Sharma S, Crow HC, et al. Reliability and diagnostic validity of a joint vibration analysis device. *BMC Oral Health.* 2017; 17(1):56.
133. Sharma S, Crow HC, et al. Systematic review of reliability and diagnostic validity of joint vibration analysis for diagnosis of temporomandibular disorders. *J Orofac Pain.* 2013; 21(1):51-60.
134. Stoll ML, Good J, et al. Intra-articular corticosteroid injections to the temporomandibular joints are safe and appear to be effective therapy in children with juvenile idiopathic arthritis. *J Oral Maxillofac Surg.* 2012; 70(8):1802-7.
135. Stoustrup P, Koos B. Clinical craniofacial examination of patients with juvenile idiopathic arthritis. *Semin Orthod.* 2015; 21(2):94-101.
136. Stoustrup P, Twilt M, et al. Clinical Orofacial Examination in Juvenile Idiopathic Arthritis: International Consensus-based Recommendations for Monitoring Patients in Clinical Practice and Research Studies. *J Rheumatol.* 2017; 44(3):326-33.
137. Strauß G, Hofer M, et al. Genauigkeit und Präzision in der Bewertung von chirurgischen Navigations- und Assistenzsystemen. *HNO.* 2006; 54(2):78-84.

-
138. Sutton DI, Sadowsky PL, et al. Temporomandibular joint sounds and condyle/disk relations on magnetic resonance images. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1992; 101(1):70-8.
139. Tallents RH, Hatala M, et al. Temporomandibular joint sounds in asymptomatic volunteers. *J Prosthet Dent.* 1993; 69(3):298-304.
140. Taylor DB, Babyn P, et al. MR evaluation of the temporomandibular joint in juvenile rheumatoid arthritis. *J Comput Assist Tomogr.* 1993; 17(3):449-54.
141. Tenbrock K. Clinical features and therapy of rheumatic diseases and vasculitides in childhood. *rheuma plus.* 2015; 14(2):32-9.
142. Tognini F, Manfredini D, et al. Is clinical assessment valid for the diagnosis of temporomandibular joint disk displacement? *Minerva Stomatol.* 2004; 53(7-8):439-48.
143. Türp JC, Schindler HJ. Myoarthropathien des Kausystems V-Kiefergelenkgeräusche: Knacken und Reiben. *Zahn Prax.* 2005; 6:374-9.
144. Twilt M, Schulten AJ, et al. Facioskeletal changes in children with juvenile idiopathic arthritis. *Ann Rheum Dis.* 2006; 65(6):823-5.
145. Twilt M, Schulten AJM, et al. Long - term followup of temporomandibular joint involvement in juvenile idiopathic arthritis. *Arthritis Care Res (Hoboken).* 2008; 59(4):546-52.
146. Tzaribachev C, Tzaribachev N, et al. Die juvenile idiopathische Arthritis und das Kiefergelenk. *Inf Orthod Kieferorthop.* 2013; 45(03):135-9.
147. Tzaribachev N, Fischer-Brandies H, et al. Chronische autoimmune Arthritis der Kiefergelenke—interdisziplinäre Therapieansätze. *Inf Orthod Kieferorthop.* 2013; 45(03):141-6.
148. Tzaribachev N, Schäfer J, et al. Juvenile idiopathische Arthritis—die heimliche Entzündung kindlicher Kiefergelenke. *Fortschr Röntgenstr.* 2009; 181(4):303-5.
149. Tzaribachev N, Weber D, et al. Juvenile idiopathische Arthritis. *Z Rheumatol.* 2010; 69(2):124-9.
150. Vaid YN, Dunnivant FD, et al. Imaging of the temporomandibular joint in juvenile idiopathic arthritis. *Arthritis Care Res (Hoboken).* 2014; 66(1):47-54.
151. Von Kalle T, Winkler P, et al. Contrast-enhanced MRI of normal temporomandibular joints in children—is there enhancement or not? *Rheumatology.* 2012; 52(2):363-7.
152. Wabeke KB, Spruijt RJ, et al. Evaluation of a technique for recording temporomandibular joint sounds. *J Prosthet Dent.* 1992; 68(4):676-82.
153. Wahlund K, List T, et al. Temporomandibular disorders in children and adolescents: reliability of a questionnaire, clinical examination, and diagnosis. *J Orofac Pain.* 1998; 12(1).
154. Watt DM. Clinical applications of gnathosonics. *J Prosthet Dent.* 1966; 16(1):83-95.
155. Website. International Network for Orofacial Pain and Related Disorders Methodology. Available from: <https://ubwp.buffalo.edu/rdc-tmdinternational/tmd-assessmentdiagnosis/rdc-tmd/translations/> [Zugriff 12.03.2018].
156. Website. Myotronics, Kent, Washington. Available from: <http://www.myotronics.com/products/k7-evaluation-system/> [Zugriff 18.10.2019].
157. Website. Universität Zürich zur Methodenprüfung: Mann-Whitney-U-Test. Available from:

http://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/mann.html [Zugriff 20.10.2019].

158. Website der Firma BioResearch Associates I. Available from: <http://www.bioresearchinc.com/biouniversity/videos/operations-videos/jvavideos> [Zugriff 22.06.2019].

159. Website der Firma BioResearch Associates I. updatet 2018; Available from: <http://www.bioresearchinc.com/products/biojva> [Zugriff 03.06.2019].

160. Weiß C. Basiswissen Medizinische Statistik. 5. ed: Springer Medizin Verlag Heidelberg; 2010.

161. Widmalm S-E, Larsson E-M. A new method for recording temporomandibular joint sounds and electrical jaw muscle activity in relation to jaw opening degree. *Acta Odontol Scand.* 1982; 40(6):429-34.

162. Widmalm SE, Bae HE, et al. Inaudible temporomandibular joint vibrations. *Cranio.* 2006; 24(3):207-12.

163. Widmalm SE, Dong Y, et al. Unbalanced lateral mandibular deviation associated with TMJ sound as a sign in TMJ disc dysfunction diagnosis. *J Oral Rehabil.* 2016; 43(12):911-20.

164. Widmalm SE, Westesson PL, et al. Temporomandibular joint sounds: correlation to joint structure in fresh autopsy specimens. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1992; 101(1):60-9.

165. Widmalm SE, Williams WJ, et al. The wave forms of temporomandibular joint sound clicking and crepitation. *Journal of oral rehabilitation.* 1996; 23(1):44-9.

166. Widmalm SE, Williams WJ, et al. The wave forms of temporomandibular joint sound clicking and crepitation. *J Oral Rehabil.* 1996; 23(1):44-9.

167. Widmalm SE, Williams WJ, et al. Localization of TMJ sounds to side. *J Oral Rehabil.* 2002; 29(10):911-7.

168. Widmalm SE, Williams WJ, et al. Short communication: False localization of TMJ sounds to side is an important source of error in TMD diagnosis. *J Oral Rehabil.* 1999; 26:213.

169. Yang KP, Koh KH, et al. Bilateral sound propagation characteristics in electronic TMJ sound recording. *Biomed Sci Instrum.* 1998; 35:181-6.

170. Yiannios N, Ben Sutter DMD, et al. TMJ Vibration Changes Following Immediate Complete Anterior Guidance Development. Available from: http://www.researchgate.net/profile/Ben_Sutter/publication/328318956_TMJ_Vibration_Changes_Following_Immediate_Complete_Anterior_Guidance_Development/links/5bc631f0a6fdcc03c7893814/TMJ-Vibration-Changes-Following-Immediate-Complete-Anterior-Guidance-Development.pdf [Zugriff 19.10.2019].

171. Zhang J, Whittle T, et al. The reproducibility of temporomandibular joint vibrations over time in the human. *J Oral Rehabil.* 2014; 41(3):206-17.

172. Zwiri AM, Al-Omiri MK. Prevalence of temporomandibular joint disorder among North Saudi University students. *Cranio.* 2016; 34(3):176-81.

7. Erklärung zum Eigenanteil

Die vorliegende Arbeit wurde unter der ständigen Betreuung und Vermittlung der relevanten Methodik von Prof. Dr. Dr. Arnim Godt, Universitätsklinik für Zahn, - Mund, -und Kieferheilkunde, Poliklinik für Kieferorthopädie, Tübingen, angefertigt. Prof. Godt stellte die im Rahmen der von ihm geleiteten Arbeitsgruppe vorhandenen Messdaten der gesunden Probanden zur Verfügung, die durch mich selbstständig und vollständig ausgewertet wurden. Die vollständig anonymisierten Vergleichsdaten der JIA Patienten aus der klinischen Routinebehandlung wurden ebenfalls von Prof. Godt zur Verfügung gestellt und waren bereits ausgewertet.

Die biometrische Beratung und Unterstützung in der statistischen Auswertung erfolgte durch Dr. Blumenstock, Institut für Biometrie, Universitätsklinikum Tübingen, unter Vermittlung durch Prof. Dr. Bernd Koos, Poliklinik für Kieferorthopädie, UKT.

Ich versichere, das Manuskript selbstständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben. Wörtlich oder inhaltlich übernommene Stellen wurden als solche gekennzeichnet.

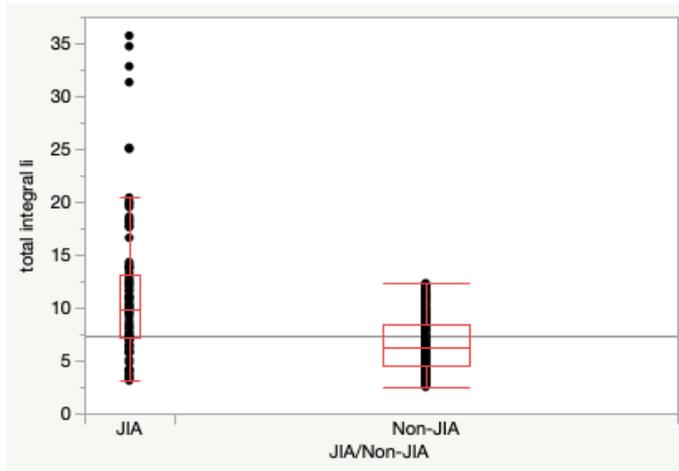
Die vorgelegte Dissertation wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form in einem anderen Promotionsverfahren vorgelegt. Bei keiner anderen Hochschule wurde ein Promotionsverfahren oder entsprechendes Prüfungsverfahren beantragt. Den Grad eines Dr. med. dent. habe ich noch nicht erworben.

Stuttgart, den 07.03.2020

8. Anhang

8.1 Überprüfung auf Signifikanz JIA/Non-JIA mittels Mann-Whitney-U-Test

Oneway Analysis of total integral li By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	3,1	4,74	7,125	9,9	13,2	20	35,7
Non-JIA	2,5	3,6	4,6	6,2	8,5	10	12,3

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	36956,0	25696,0	419,955	7,734
Non-JIA	495	133280	144540	269,253	-7,734

2-Sample Test, Normal Approximation

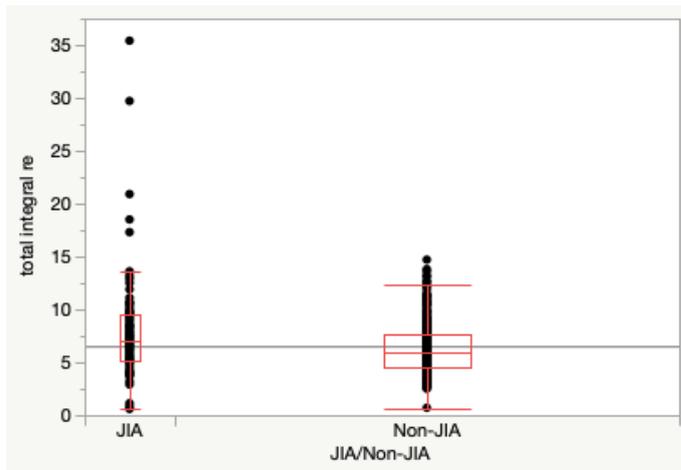
S	Z	Prob> Z
36956	7,73389	<,0001*

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
59,8184	1	<,0001*

Missing Rows	1
Excluded Rows	146

Oneway Analysis of total integral re By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	0,59	3,79	5,225	7,05	9,575	12,9	35,4
Non-JIA	0,7	3,76	4,5	5,9	7,7	9,1	14,7

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	30756,5	25696,0	349,506	3,476
Non-JIA	495	139480	144540	281,777	-3,476

2-Sample Test, Normal Approximation

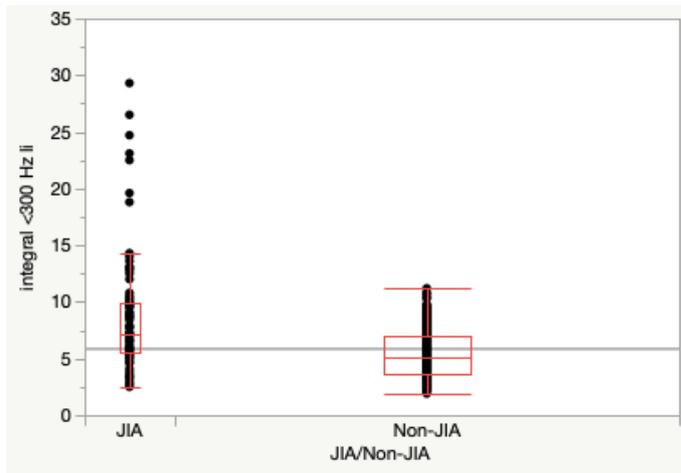
S	Z	Prob> Z
30756,5	3,47569	0,0005*

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
12,0828	1	0,0005*

Missing Rows	1
Excluded Rows	146

Oneway Analysis of integral <300 Hz li By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	2,5	3,5	5,55	7,15	9,875	14,03	29,3
Non-JIA	1,9	2,9	3,7	5,1	7	8,4	11,2

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	35458,5	25740,0	402,938	6,663
Non-JIA	496	135362	145080	272,906	-6,663

2-Sample Test, Normal Approximation

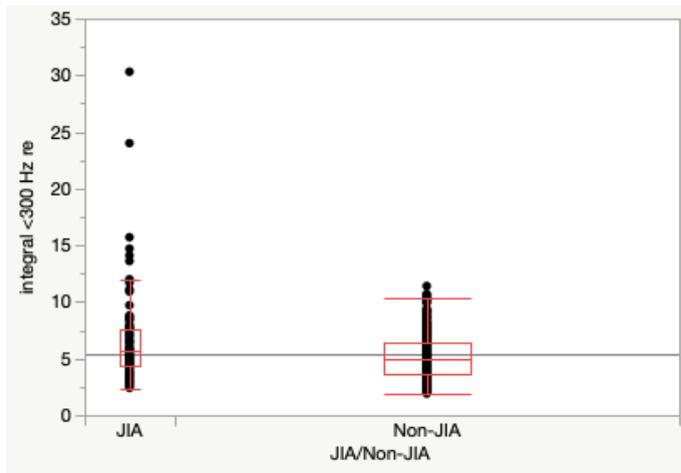
S	Z	Prob> Z
35458,5	6,66285	<,0001*

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
44,3982	1	<,0001*

Excluded Rows 146

Oneway Analysis of integral <300 Hz re By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	2,4	3,28	4,425	5,7	7,6	11,16	30,3
Non-JIA	1,9	3	3,7	4,9	6,4	7,7	11,4

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	30537,5	25740,0	347,017	3,289
Non-JIA	496	140283	145080	282,828	-3,289

2-Sample Test, Normal Approximation

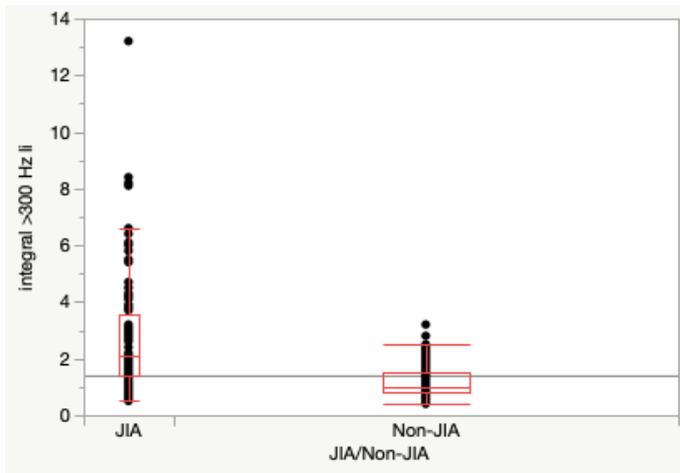
S	Z	Prob> Z
30537,5	3,28908	0,0010*

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
10,8203	1	0,0010*

Excluded Rows 146

Oneway Analysis of integral >300 Hz li By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	0,5	0,8	1,425	2,1	3,575	5,82	13,2
Non-JIA	0,4	0,6	0,8	1	1,5	1,9	3,2

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	39003,0	25740,0	443,216	9,113
Non-JIA	496	131817	145080	265,760	-9,113

2-Sample Test, Normal Approximation

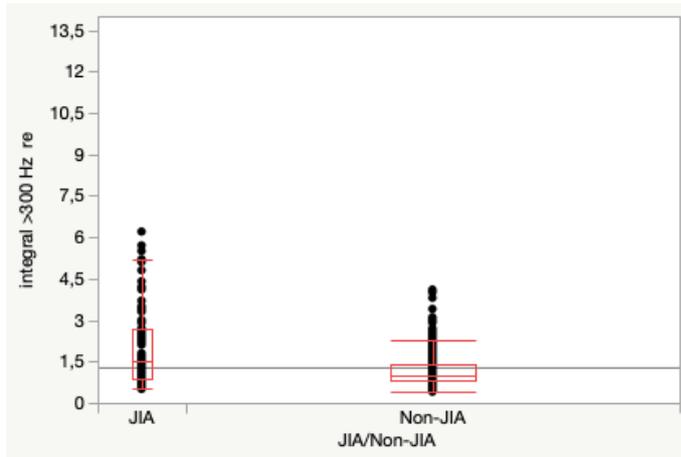
S	Z	Prob> Z
39003	9,11267	<,0001*

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
83,0471	1	<,0001*

Excluded Rows 146

Oneway Analysis of integral >300 Hz re By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	0,5	0,79	0,9	1,5	2,7	4,22	6,2
Non-JIA	0,4	0,7	0,8	1	1,4	1,93	4,1

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	34447,0	25740,0	391,443	5,987
Non-JIA	496	136373	145080	274,946	-5,987

2-Sample Test, Normal Approximation

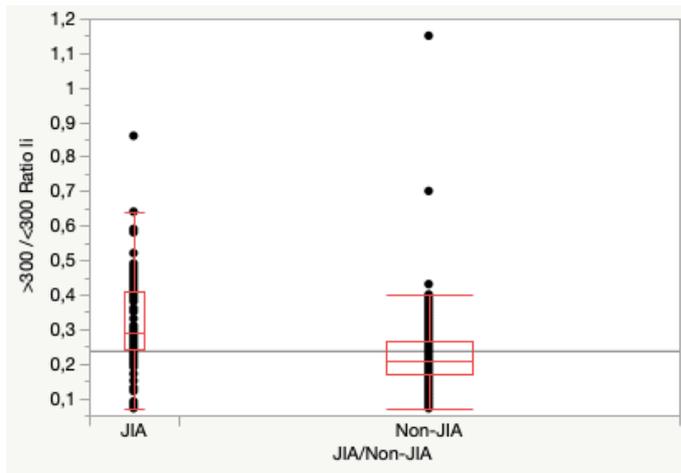
S	Z	Prob> Z
34447	5,98737	<,0001*

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
35,8527	1	<,0001*

Excluded Rows 146

Oneway Analysis of >300 /<300 Ratio li By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	0,07	0,15	0,24	0,29	0,4075	0,471	0,86
Non-JIA	0,07	0,14	0,17	0,21	0,2675	0,313	1,15

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	36517,0	25740,0	414,966	7,395
Non-JIA	496	134303	145080	270,772	-7,395

2-Sample Test, Normal Approximation

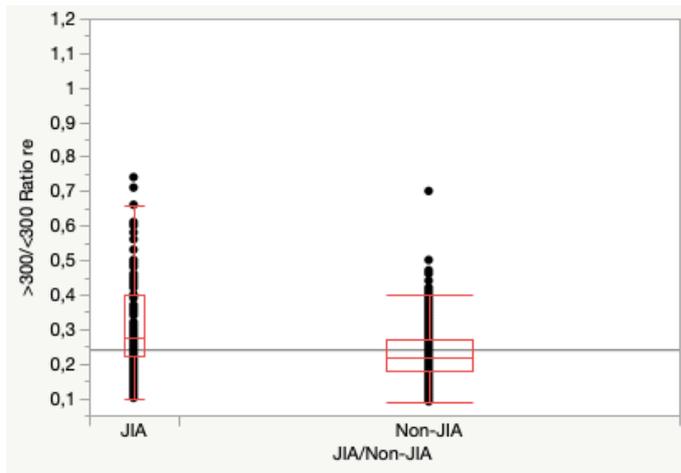
S	Z	Prob> Z
36517	7,39456	<,0001*

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
54,6847	1	<,0001*

Excluded Rows 146

Oneway Analysis of >300/<300 Ratio re By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	0,1	0,14	0,2225	0,275	0,3975	0,503	0,74
Non-JIA	0,09	0,14	0,18	0,22	0,27	0,32	0,7

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	33509,5	25740,0	380,790	5,331
Non-JIA	496	137311	145080	276,836	-5,331

2-Sample Test, Normal Approximation

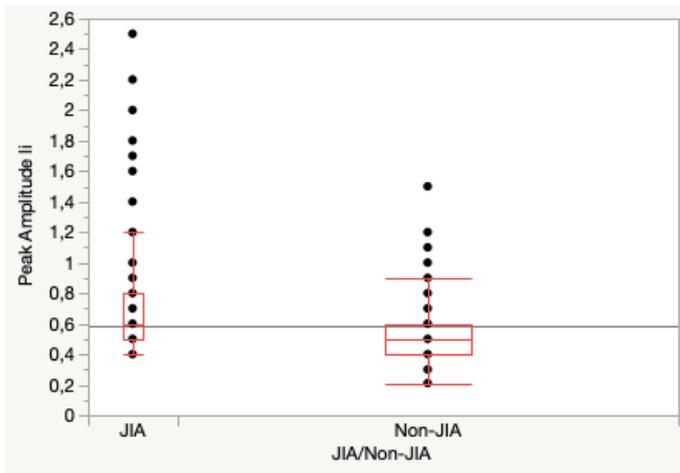
S	Z	Prob> Z
33509,5	5,33095	<,0001*

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
28,4226	1	<,0001*

Excluded Rows 146

Oneway Analysis of Peak Amplitude li By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	1,02	2,5
Non-JIA	0,21	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	1,5

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	32698,5	25740,0	371,574	4,917
Non-JIA	496	138122	145080	278,471	-4,917

2-Sample Test, Normal Approximation

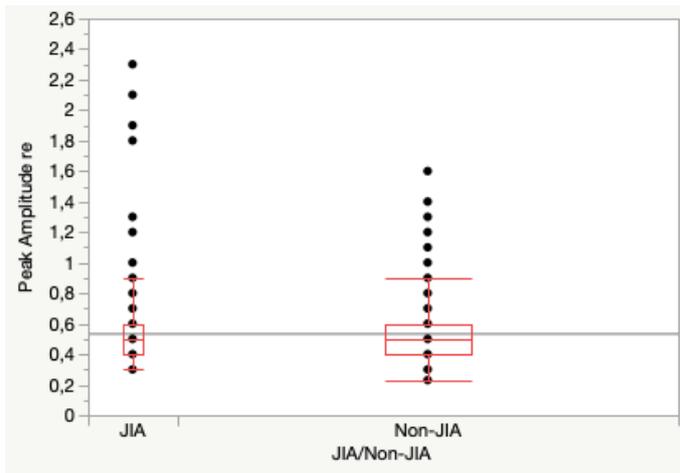
S	Z	Prob> Z
32698,5	4,91664	<,0001*

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
24,1768	1	<,0001*

Excluded Rows 146

Oneway Analysis of Peak Amplitude re By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,9	2,3
Non-JIA	0,23	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	1,6

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	27437,0	25740,0	311,784	1,216
Non-JIA	496	143383	145080	289,079	-1,216

2-Sample Test, Normal Approximation

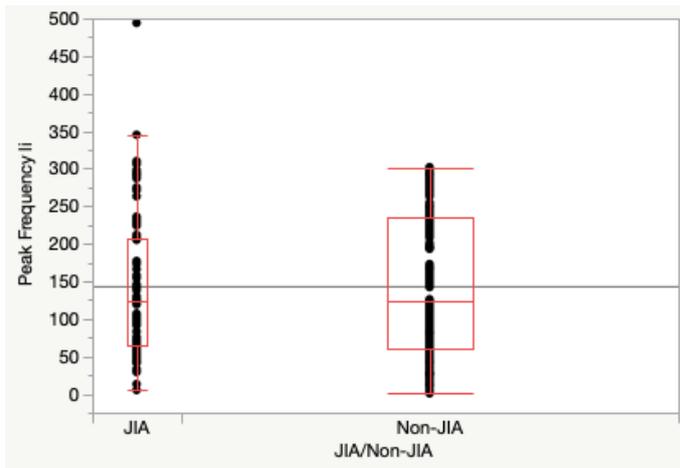
S	Z	Prob> Z
27437	1,21640	0,2238

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
1,4805	1	0,2237

Excluded Rows 146

Oneway Analysis of Peak Frequency li By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	5	32,6	65	124,5	207,25	291,3	494
Non-JIA	0,5	33	60	124,5	235	283	302

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	25997,0	25740,0	295,420	0,176
Non-JIA	496	144823	145080	291,982	-0,176

2-Sample Test, Normal Approximation

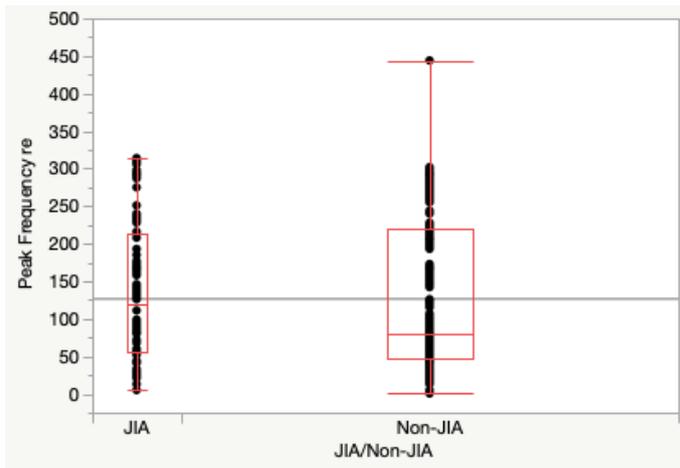
S	Z	Prob> Z
25997	0,17588	0,8604

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
0,0311	1	0,8601

Excluded Rows 146

Oneway Analysis of Peak Frequency re By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	5	28,6	57	118,5	214	294	314
Non-JIA	0,4	17	48	80	220	279	444

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	28074,0	25740,0	319,023	1,600
Non-JIA	496	142746	145080	287,794	-1,600

2-Sample Test, Normal Approximation

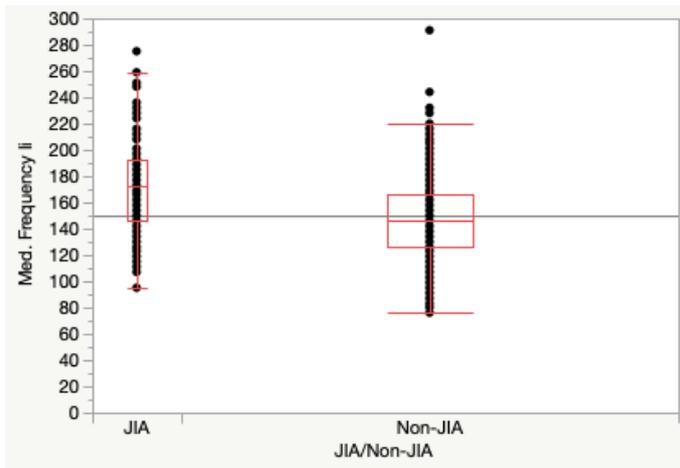
S	Z	Prob> Z
28074	1,60021	0,1096

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
2,5618	1	0,1095

Excluded Rows 146

Oneway Analysis of Med. Frequency li By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	95	126	146	173	193	228,4	275
Non-JIA	76	103	126	146	166	189	291

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	34861,5	25740,0	396,153	6,257
Non-JIA	496	135959	145080	274,110	-6,257

2-Sample Test, Normal Approximation

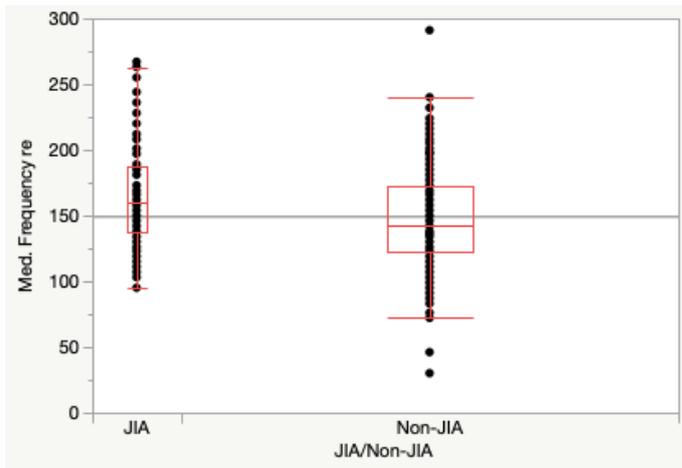
S	Z	Prob> Z
34861,5	6,25739	<,0001*

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
39,1593	1	<,0001*

Excluded Rows 146

Oneway Analysis of Med. Frequency re By JIA/Non-JIA



Quantiles

Level	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
JIA	95	118,6	138	160	188	228	267
Non-JIA	30	105,8	123	142	172	193	291

Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
JIA	88	31341,0	25740,0	356,148	3,842
Non-JIA	496	139479	145080	281,208	-3,842

2-Sample Test, Normal Approximation

S	Z	Prob> Z
31341	3,84190	0,0001*

1-Way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
14,7628	1	0,0001*

Excluded Rows 146

8.2 Vollständige Statistik des ICC (Reliabilität)

Skala: total integral li

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	30	96,8
	Ausgeschlossen ^a	1	3,2
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,980	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahrem Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
		Einzelne Maße	,754 ^a	,653	,850
Durchschnittliche Maße	,980 ^c	,968	,989	49,979	29

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahrem Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	435	,000
Durchschnittliche Maße	435	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: total integral li (w/o measurement 3)

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,977	15

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahren Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
		Einzelne Maße	,745 ^a	,643	,842
Durchschnittliche Maße	,978 ^c	,964	,988	44,399	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahren Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	420	,000
Durchschnittliche Maße	420	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: total integral re

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,967	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahren Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
		Einzelne Maße	,639 ^a	,520	,765
Durchschnittliche Maße	,966 ^c	,946	,981	30,108	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahren Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: integral <300 Hz li

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,977	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahrem Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
Einzelne Maße	,730 ^a	,625	,831	43,905	30
Durchschnittliche Maße	,977 ^c	,964	,987	43,905	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahrem Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: integral <300 Hz re

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,967	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahren Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
Einzelne Maße	,639 ^a	,520	,765	30,108	30
Durchschnittliche Maße	,966 ^c	,946	,981	30,108	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahren Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: integral >300 Hz li

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,968	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahren Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
		Einzelne Maße	,644 ^a	,525	,768
Durchschnittliche Maße	,967 ^c	,947	,981	31,061	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahren Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: integral >300 Hz re

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,960	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahren Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
		Einzelne Maße	,591 ^a	,468	,727
Durchschnittliche Maße	,959 ^c	,934	,977	24,959	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahren Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: >300 /<300 Ratio li

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,883	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahrem Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
		Einzelne Maße	,309 ^a	,205	,462
Durchschnittliche Maße	,878 ^c	,805	,932	8,570	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahrem Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: >300 /<300 Ratio re

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,939	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahrem Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
		Einzelne Maße	,483 ^a	,360	,635
Durchschnittliche Maße	,937 ^c	,900	,965	16,509	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahrem Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: Peak Amplitude li

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,945	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahrem Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
Einzelne Maße	,519 ^a	,395	,667	18,122	30
Durchschnittliche Maße	,945 ^c	,913	,970	18,122	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahrem Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: Peak Amplitude re

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,938	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahrem Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
		Einzelne Maße	,481 ^a	,357	,633
Durchschnittliche Maße	,937 ^c	,899	,965	16,224	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahrem Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: Peak Frequency li

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,945	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahren Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
Einzelne Maße	,521 ^a	,397	,669	18,222	30
Durchschnittliche Maße	,946 ^c	,913	,970	18,222	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahren Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: Peak Frequency re

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,869	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahren Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
		Einzelne Maße	,295 ^a	,192	,446
Durchschnittliche Maße	,870 ^c	,792	,928	7,648	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahren Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: Med. Frequency li

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,957	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahrem Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
		Einzelne Maße	,580 ^a	,457	,718
Durchschnittliche Maße	,957 ^c	,931	,976	23,010	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahrem Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

a. Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.

b. Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.

c. Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.

Reliabilität

Skala: Med. Frequency re

Zusammenfassung der Fallverarbeitung

		N	%
Fälle	Gültig	31	100,0
	Ausgeschlossen ^a	0	,0
	Gesamt	31	100,0

a. Listenweise Löschung auf der Grundlage aller Variablen in der Prozedur.

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs	
Alpha	Anzahl der Items
,954	16

Korrelationskoeffizient in Klassen

	Korrelation innerhalb der Klasse ^b	95%-Konfidenzintervall		F-Test mit wahren Wert 0	
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1
Einzelne Maße	,560 ^a	,436	,702	21,787	30
Durchschnittliche Maße	,953 ^c	,925	,974	21,787	30

Korrelationskoeffizient in Klassen

	F-Test mit wahren Wert 0 ^b	
	df2	Sig.
Einzelne Maße	450	,000
Durchschnittliche Maße	450	,000

Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten, bei dem die Personeneffekte zufällig und die Maßeffekte fest sind.

- Der Schätzer ist derselbe, unabhängig davon, ob ein Wechselwirkungseffekt vorliegt oder nicht.
- Korrelationskoeffizienten des Typs A innerhalb der Klasse unter Verwendung einer Definition der absoluten Übereinstimmung.
- Die Schätzung wird unter der Annahme berechnet, daß kein Wechselwirkungseffekt vorliegt, da anderenfalls keine Schätzung durchgeführt werden könnte.