

Sebastian Mangold

**Erfassung heterogener passiver Anwendereigenschaften
und deren Abbildung in einem einstellbaren Hand-Arm
Modell am Beispiel eines Impulsschraubers**

Acquisition of user's heterogeneous biodynamic
response and possibilities to model those in an
adjustable hand-arm model using the example of an
impulse wrench

Band 125

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2019
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

Erfassung heterogener passiver Anwendereigenschaften und deren Abbildung in einem einstellbaren Hand-Arm Modell am Beispiel eines Impulsschraubers

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene
DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Sebastian Mangold

Tag der mündlichen Prüfung: 24. September 2019
Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Krause

Vorwort der Herausgeber (Stand: Juli 2017)

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 125

Power-Tools stehen in direkter Interaktion mit dem Anwender. Bei der entwicklungsbegleitenden Validierung von Power-Tools ist die Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen unabdingbar, da sie Einfluss auf alle auszulegenden Systemkomponenten haben. Ein Teil dieser Wechselwirkungen wird durch passive Anwendereigenschaften beeinflusst. Die mechanische Impedanz ist die gängige physikalische Größe, mit der die passiven Eigenschaften beschrieben werden. Diese passiven Eigenschaften resultieren aus dem dynamisch-mechanischen Verhalten des Anwenders und können durch den Anwender selbst nur indirekt, z.B. durch Muskelanspannungen, beeinflusst werden. Bei handgeführten Power-Tools ist die Impedanz des Hand-Arm Systems besonders relevant. Im Stand der Forschung gibt es große Wissenslücken zur Impedanz des menschlichen Hand-Arm Systems bei Rotationsanregung. Auch ist unbekannt, wie sich die passiven Anwendereigenschaften bei Variation von Haltung, Greifkraft und Andruckkraft verändern. Des Weiteren ist aus dem Stand der Forschung nicht bekannt, ob die mechanischen Impedanzen verschiedener Anwender Auswirkungen auf Funktion, Beanspruchung und Lebensdauer eines Power-Tools haben und inwieweit dies zu Unsicherheiten im Produktentwicklungsprozess führt. Valide prüfstandtaugliche Modelle zur Abbildung der mechanischen Impedanz für die Rotationsrichtung sind im Stand der Forschung ebenfalls nicht verfügbar.

Die vorliegende Forschungsarbeit liefert wichtige Beiträge, um diese Lücken im Stand der Forschung zu schließen. Die von Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Mangold vorgelegte Forschungsarbeit verfolgt drei wesentliche Ziele: Erstens die Beantwortung der Frage, ob durch Variation der passiven Anwendereigenschaften veränderte Beanspruchungen in den untersuchten Power-Tools auftreten. Zweitens die Erforschung einer neuen Untersuchungsmethode, um eine anwendungsnahe Analyse der passiven Anwendereigenschaften am Power-Tool zu ermöglichen. Drittens die Realisierbarkeit eines physischen Modells, das die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in der Drehung zur Unterarmachse abbilden kann, um es in der produktentwicklungsbegleitenden Validierung einzusetzen.

Um den Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten zu untersuchen und messbar zu machen, entwickelt Herr Mangold für zwei sehr unterschiedliche Power-Tool Gerätetypen Messtechnik in Form von Messgriffen und spezielle Anzeigemethoden, um Probanden während der Experimente zu lenken. Ein wichtiges Ergebnis der Arbeit besteht im fundierten Nachweis, dass die Berücksichtigung von passiven Anwendereigenschaften in der entwicklungsbegleitenden Validierung zwingend notwendig ist. Dies gelingt auf Basis umfangreicher Experimente, die nachweisen, dass die passiven Anwendereigenschaften Einfluss auf Gerätebeschleunigungen im Einsatz haben und damit die Funktionalität und die Beanspruchung der einzelnen Gerätekomponenten beeinflussen.

Am Beispiel des Impulsschraubers wird eine Methode entwickelt, mit der die passiven Anwendereigenschaften erstmals direkt am Power-Tool in verschiedenen Haltungen des Anwenders in einer Drehbewegung untersucht und über die Impedanz in Betrag und Phase quantifiziert werden. Herr Mangold leitet aus den Messungen theoretische Modelle ab. Diese überführt er in physisch abbildbare Hand-Arm Modelle, die er technisch realisiert. Diese Überführung ist neu. Erstmals entstehen Modelle, die mit wenigen Freiheitsgraden – nur dann ist das Modell sinnvoll physisch zu realisieren – durch justierbare Parameter in der Lage sind, heterogene passive Anwendereigenschaften abzubilden. Herr Mangold stellt ein neuartiges Konzept eines physischen Hand-Arm Modells vor, welches erstmalig eine Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften durch den Einsatz veränderlicher Steifigkeiten, Dämpfungen und Massenträgheitsmomente für einen Impulsschrauber physisch in einer Drehung zur Unterarmachse durch einen Zweimassen-Schwinger abbilden kann.

September, 2019

Sven Matthiesen

Kurzfassung

Power-Tools stehen in direkter Interaktion mit dem Anwender. Bei der entwicklungsbegleitenden Validierung von Power-Tools ist die Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen unabdingbar, da sie Einfluss auf alle auszulegenden Systemkomponenten haben. Ein Teil dieser Wechselwirkungen besteht aus Interaktionen, die den passiven Anwendereigenschaften entspringen. Diese resultieren aus dem mechanisch-dynamischen Verhalten des Anwenders und können somit durch den Anwender selbst nur indirekt beeinflusst werden. Innerhalb dieser Arbeit wird durch Untersuchungen am Bohrhammer und am Impulsschrauber beispielhaft gezeigt, dass die veränderlichen passiven Anwendereigenschaften einen Einfluss auf die Beanspruchung von Power-Tools in manuellen Tests während der Hauptfunktionserfüllung haben können. Die passiven Anwendereigenschaften werden hierfür durch Variation des Probanden, der Haltung und der Greif- und Andruckkraft unter Nutzung entwickelter Untersuchungsmethoden in Versuchen reproduzierbar verändert. Des Weiteren wird am Beispiel des Impulsschraubers eine Methode entwickelt, mit der die passiven Anwendereigenschaften erstmals direkt am Power-Tool in verschiedenen Haltungen des Anwenders in einer Drehbewegung untersucht und über die Impedanz in Betrag und Phase quantifiziert werden können. Ergebnis der auf dieser Methode basierenden Untersuchungen ist, dass bei der Nutzung eines Impulsschraubers Haltung, Greifkraft und Proband sowohl den Betrag als auch die Phase der Impedanz des Hand-Arm Systems verändern. Da nicht reproduzierbare Wechselwirkungen, wie sie durch die Heterogenität der passiven Anwenderinteraktionen in entwicklungsbegleitenden manuellen Tests auftreten, zu Unsicherheiten und späten Iterationen in der Entwicklung führen, wird ein Ansatz vorgestellt, der diese Interaktionen in einem schwingungstechnisch gleichwertigen Modell abbildet. Die über den Stand der Forschung hinausgehende Neuerung dieses Ansatzes besteht dabei in der Möglichkeit, die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in einer Drehung zur Unterarmachse in einem physischen Modell abzubilden. Es wird gezeigt, dass ein rotatorisch wirkendes physisches Hand-Arm Modell, das auf einem Zweimassen-Schwinger basiert, durch den Einsatz veränderlicher Steifigkeiten, Dämpfungen und Massenträgheitsmomente dazu genutzt werden kann, die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften bei einer Anregungsfrequenz von 23 Hz in Grenzen zu modellieren.

Abstract

Power tools have direct interactions with the user. During the development-related validation of power tools, the consideration of these interactions is essential, since they have influence on all system components to be developed. A part of the interactions is induced by the passive user behavior, i.e. they result from the user's biodynamic response and are only indirectly influenced by the user. In this thesis, investigations on a hammer drill and an impulse wrench are used as an example to demonstrate that the variable passive user behavior can have an influence on the strain of power tools in manual tests during the main function fulfillment. The passive user behavior is therefore reproducibly changed by changing the subject, the posture and the gripping and pressing force using developed testing methods. Using the impulse wrench as an example, a method has been developed which allows for the first time to investigate and quantify the passive user behavior in different positions by impedance in magnitude and phase in rotational movements at the handle of a power tool. The result of the investigations based on this method is that posture, gripping force and test person change the magnitude as well as the phase of the impedance of the hand-arm system when using an impulse wrench. Since non-reproducible interactions, such as those caused by the heterogeneity of passive user interactions in manual tests during development, can lead to uncertainties and late iterations in development, an approach is presented to reproduce these interactions in a model which is equivalent in terms of dynamical properties. Beyond the state of the art, the improvement of this approach is the possibility to reproduce the heterogeneity of the passive user behavior in a rotation to the forearm axis by a physical model. It is shown that a rotational physical hand-arm model based on a dual-mass oscillator can be used within limits by using variable stiffness, damping and inertia to reproduce the heterogeneity of passive user behavior at an excitation frequency of 23 Hz.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter des Lehrstuhls für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Meinen größten Dank möchte ich meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen aussprechen. Wie kein anderer begleitete er mich durch meine Forschungsarbeit und gab mir immer wieder neue Denkanstöße, um meine Arbeit voranzutreiben. In zahlreichen langen und kurzen Gesprächen zu früher und später Stunde prägte er neben meiner wissenschaftlichen auch meine berufliche Entwicklung in entscheidendem Maße. Ich möchte mich bei ihm herzlich für das uneingeschränkte Vertrauen bedanken, das er mir in meinen verschiedenen Funktionen am Lehrstuhl entgegenbrachte. Dieses tiefe Vertrauen gab mir zu jeder Zeit das Gefühl von Geborgenheit am Lehrstuhl.

Für die Übernahme des Korreferates bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Krause. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Elsner möchte ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danken.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente aussprechen, die mich begleitet haben. Ich werde mich immer mit größter Freude an die gemeinsamen Gespräche im wissenschaftlichen, beruflichen und vor allem im freundschaftlichen Sinne erinnern. Ich kann behaupten, dass ich zu jedem Zeitpunkt stolz war, mit jedem Einzelnen arbeiten zu dürfen. Auch den weiteren Mitarbeitern des IPEK bin ich zu größtem Dank verpflichtet. Ein besonderer Dank geht hierbei an die Mitarbeiter der technischen Dienste, der Administration und der IT, die mich uneingeschränkt unterstützt haben.

Weiter bedanke ich mich bei allen Abschlussarbeitern, die ich wissenschaftlich begleiten durfte. Sie haben mit vielen anregenden Gesprächen und hilfreicher Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Zudem möchte ich auch den Probanden für die Teilnahme an den durchgeführten Studien danken.

Nicht zuletzt gilt mein größter und herzlichster Dank meiner Familie für die uneingeschränkte Unterstützung zu jeder Tages- und Nachtzeit. Ohne den Rückhalt, die Unterstützung und den Antrieb durch meine Frau Saskia wäre wohl so manches Ziel unerreicht davongeflossen. Meine Tochter zeigte mir auch in den schwersten Phasen meiner Arbeit, dass man niemals auf dem Boden liegen bleibt, wenn man auf die Nase fällt.

„Die meiste Zeit geht dadurch verloren, dass man nicht zu Ende denkt.“

Alfred Herrhausen (1930-1989)

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Eingliederung der Arbeit.....	1
1.2	Aufbau der Arbeit.....	7
2	Grundlagen und Stand der Forschung	9
2.1	Das Super-System Power-Tool	9
2.2	Grundlagen zu Bohrhämmern und Impulsschraubern.....	10
2.2.1	Grundlagen zu Bohrhämmern	11
2.2.2	Grundlagen zu Impulsschraubern.....	12
2.3	Die passiven Anwendereigenschaften.....	13
2.3.1	Definition der passiven Anwendereigenschaften.....	13
2.3.2	Messung der Impedanz	14
2.3.3	Definition der Koordinatensysteme.....	17
2.3.4	Darstellungsformen für die Impedanz.....	18
2.3.5	Einflussfaktoren auf die Impedanz.....	19
2.3.6	Modelle zur Beschreibung der passiven Anwendereigenschaften	28
2.3.7	Mechanische Schaltungsstruktur zur Berechnung von Modellimpedanzen	37
2.4	Abbildung der passiven Anwendereigenschaften in Prüfständen für Power-Tools.....	39
2.4.1	Prüfstände für Kettensägen	39
2.4.2	Prüfstände für Bohrhämmer	40
2.4.3	Prüfstände für Schrauber.....	45
2.5	Messgriffe an Power-Tools.....	46
2.6	XiL-Validierungsansatz für Power-Tools.....	47
2.7	Fazit zum Stand der Forschung.....	50
3	Motivation und Zielsetzung der Arbeit	51
3.1	Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf Power-Tools und deren Beanspruchung in manuellen Tests	51
3.2	Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Griff eines Power-Tools.....	52
3.3	Physische Modellierung der passiven Anwendereigenschaften.....	53
4	Forschungsdesign	54
4.1	Forschungsvorgehen	54
4.2	Forschungsfragen.....	56
5	Relevanz passiver Anwendereigenschaften in manuellen Power-Tool Tests	58
5.1	Theoretische Vorbetrachtung (Analysephase)	58
5.2	Ansatz zur Quantifizierung des Bewegungsverhaltens (Analysephase)	61

5.3	Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Bohrhammers (Methodenentwicklungsphase).....	64
5.3.1	Messgriff zur Aufnahme der Andruck- und Greifkraft sowie der Power-Tool-Vibration	65
5.3.2	Anzeige der Soll- und Istwerte der Andruck- bzw. Greifkraft für den Probanden	67
5.3.3	Kontrolle der Armhaltung des Probanden.....	68
5.3.4	Modell der Anwendung und der Umwelt für die Versuche.....	69
5.3.5	Messkette und Datenerfassung	71
5.4	Untersuchung des Einflusses veränderlicher passiver Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Bohrhammers (Methodenanwendungs- und Methodenevaluierungsphase).....	72
5.4.1	Versuchsdesign	73
5.4.2	Einfluss des Power-Tools, der Umwelt und der Anwendung auf den Beschleunigungseffektivwert des Bohrhammers.....	75
5.4.3	Ergebnisse und Diskussion	77
5.5	Zwischenfazit zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Bohrhammers	84
5.6	Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Impulsschraubers (Methodenentwicklungsphase).....	87
5.6.1	Messgriff zur Aufnahme der Andruck- und Greifkraft sowie der Power-Tool-Vibration	89
5.6.2	Anzeige der Soll- und Istwerte der Andruck- bzw. Greifkraft für den Probanden	91
5.6.3	Kontrolle der Armhaltung des Probanden.....	93
5.6.4	Modell der Anwendung für die Versuche.....	93
5.6.5	Messkette und Datenerfassung	95
5.7	Untersuchung des Einflusses veränderlicher passiver Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Impulsschraubers (Methodenanwendungs- und -evaluierungsphase)	96
5.7.1	Versuchsdesign	96
5.7.2	Einfluss des Power-Tools, der Umwelt und der Anwendung auf den Beschleunigungseffektivwert des Impulsschraubers	98
5.7.3	Ergebnisse und Diskussion	101
5.8	Zwischenfazit zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Impulsschraubers.....	109
5.9	Fazit zur Relevanz passiver Anwendereigenschaften in manuellen Power-Tool-Tests.....	112
6	Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschrauber	114
6.1	Theoretische Vorbetrachtung (Analysephase)	114
6.1.1	Mathematische Beziehungen zur Messung der passiven Anwendereigenschaften	114

6.1.2	Anforderungen an eine Methode zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Griff eines Impulsschraubers	116
6.2	Zwischenfazit zur theoretischen Vorbetrachtung für die Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschrauber	119
6.3	Untersuchung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften bei der Nutzung eines Impulsschraubers (Methodenentwicklungsphase).....	119
6.3.1	Modifikationen am Impulsschrauber-Messgriff zur Untersuchung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften	120
6.3.2	Anzeige der Soll- und Istwerte der Andruck- bzw. Greifkraft für den Probanden und Kontrolle der Armhaltung	121
6.3.3	Anwendungsmodell für die Versuche	121
6.3.4	Messkette und Datenerfassung	122
6.3.5	Aufbereitung der Messdaten und Berechnung der Impedanz	123
6.3.6	Verifikation des Messsystems und Methodenabsicherung	128
6.4	Zwischenfazit zur entwickelten Methode für die Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschraubegriff.....	134
6.5	Untersuchung der veränderlichen passiven Anwendereigenschaften am Griff bei der Nutzung eines Impulsschraubers (Methodenanwendungs- und -evaluierungsphase)	136
6.5.1	Versuchsdesign	136
6.5.2	Ergebnisse und Diskussion	139
6.6	Fazit zur Untersuchung der veränderlichen passiven Anwendereigenschaften bei der Nutzung eines Impulsschraubers	150
7	Modellierung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften	154
7.1	Theoretische Vorbetrachtung (Analysephase)	154
7.1.1	Modellansatz am Impulsschraubegriff	155
7.1.2	Vorgehen zur Optimierung eines Referenzmodells zur Nutzung am Impulsschraubegriff	157
7.1.3	Optimiertes Referenzmodell zur Nutzung am Impulsschraubegriff	159
7.2	Zwischenfazit zur theoretischen Vorbetrachtung für die Abbildung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in physischen Modellen am Impulsschrauber	161
7.3	Ableitung von rotatorisch wirkenden Hand-Arm Modellen auf Basis translatorischer Modelle (Methodenentwicklungsphase).....	163
7.3.1	Methode zur Überführung von translatorischen Hand-Arm Modellen in rotatorische Modelle zur Abbildung der passiven Anwendereigenschaften	163
7.3.2	Methode zur physischen Umsetzung des Hand-Arm Modells und dessen Komponenten zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften	166
7.4	Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften in einem physischen Modell auf Basis eines theoretischen Modells (Methodenanwendungsphase)	167
7.4.1	Realisierung der einstellbaren Dämpfung.....	167
7.4.2	Realisierung der einstellbaren Federsteifigkeit.....	168

7.4.3	Realisierung der einstellbaren Rotationsmasse	171
7.4.4	Konzept und konstruktive Umsetzung des Hand-Arm Modells zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften.....	172
7.4.5	Theoretische erreichbare Variation der Impedanz des Hand-Arm Modells zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften.....	173
7.5	Zwischenfazit zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften in einem physischen Modell auf Basis eines theoretischen Modells.....	175
7.6	Vermessung des physischen Hand-Arm Modells zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften (Methodenevaluierungsphase)	177
7.6.1	Bestimmung der Federkonstante.....	178
7.6.2	Bestimmung der Dämpfungskonstante.....	184
7.6.3	Messung der erzielten Impedanz des physischen Hand-Arm Modells	189
7.7	Fazit zur Modellierung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften im physischen Hand-Arm Modell.....	195
8	Zusammenfassung und Ausblick	198
8.1	Zusammenfassung	198
8.2	Ausblick	204
8.2.1	Forschungsfeld 1: Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf Power-Tools und deren Beanspruchung in manuellen Tests	204
8.2.2	Forschungsfeld 2: Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften.....	205
8.2.3	Forschungsfeld 3: Abbildung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in einem physischen Modell	206
8.2.4	Forschungsfeld 4: Einsatz von Hand-Arm Modellen zur Validierung von Power-Tools.....	207
9	Literaturverzeichnis	208

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	m/s^2	Beschleunigungseffektivwert
d	$Ns/m, Nms/rad$	Dämpfungskonstante
e	–	Eulersche Zahl
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
j	–	$j^2 = -1$
J	kgm^2	Massenträgheitsmoment
k	$N/m, Nm/rad$	Steifigkeitskonstante
M	kg	scheinbare Masse
m	kg	Masse
MW	–	arithmetischer Mittelwert einer Zahl
r	m	Abstand von der Drehachse
SD	–	Standardabweichung einer Zahl
t	s	Zeit
T	Nm	Moment
v	m/s	Geschwindigkeit
x, y, z	m	Wegekoordinaten in den Raumrichtungen
Z	Ns/m	Eingangsimpedanz
θ	rad	Drehung um die z-Achse (Hauptachse des Schraubers)
φ_0	rad	Nullphasenwinkel einer Schwingung
ω	$1/s$	Kreisfrequenz einer Schwingung

Indizes

Bedeutung

h	Hand-Koordinatensystem bezogen
HF	Hauptfrequenz
hv	Hand-Arm Vibration
n	Maximum eines Laufindizes
r	rotatorisch
t	translatorisch
w	in Wirkrichtung, in Hauptanregungsrichtung

Attribute

Bedeutung

\underline{X}	komplexe Zahl
\hat{X}	Amplitude
X	Matrix, Vektor
\dot{X}	erste zeitliche Ableitung
\ddot{X}	zweite zeitliche Ableitung

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Eingliederung der Arbeit

„Zu wissen wie ein Produkt seine Funktion erfüllt, welche Eigenschaften des Produktes die Funktion in welcher Art beeinflussen, ist für erfolgreiche Produktentwicklung entscheidend.“¹

Wenn der Zusammenhang zwischen Gestalt und Funktion des Produktes nicht bekannt ist, so muss dieser vor oder bei der Entwicklung durch eine geeignete Analyse herausgefunden werden um erfolgreiche Produkte entwickeln zu können². Die Absicherung der Funktionserfüllung und der Erkenntnisgewinn bezüglich der Funktion und der Eigenschaften eines Produktes sind der Kern der Validierung. Die Validierung wird durch ALBERS ET AL. als die zentrale Aktivität im Produktentwicklungsprozess beschrieben. Sie wird nicht als eine abschließende Phase, sondern als kontinuierliche Aktivität im Produktentwicklungsprozess verstanden. Durch den Abgleich zwischen Ist- und Soll-Eigenschaften des Produktes wird in der Validierung Wissen geschaffen.³ Die Lösungsqualität der aktuellen Umsetzung wird bewertet, um festzustellen, ob diese den Bedürfnissen aller Stakeholder des Produktes entspricht⁴. Iterationen sind hierbei oft unvermeidbar, wenn im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses neue Erkenntnisse erzielt werden⁵. Iterationen, in denen früh Wissen geschaffen wird, können durch frühe Validierungsschritte erzwungen werden, um späte teure Iterationen zu vermeiden⁶. Diese späten Iterationen führen im Vergleich zu frühen Iterationen innerhalb des Entwicklungsprozesses zu einem starken Anstieg der Entwicklungskosten⁷. Späte und damit teure Iterationen sind oft eine Folge von Unsicherheiten im Entwicklungs- und Validierungsprozess. So ist nach MATTHIESEN in der Produktgestaltung durch Annahmen der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge die Gestaltung des Produktes, also der Kern der Entwicklung, risikobehaftet und birgt das Risiko von Iterationen⁸. Deshalb besteht Bedarf an zuverlässigen Validierungstechniken, um späte und kostenintensive Iterationen innerhalb des

¹ Matthiesen in Schäfer 2018, Vorwort

² vgl. Matthiesen 2019

³ vgl. Albers 2010

⁴ vgl. Albers et al. 2015

⁵ vgl. Meboldt et al. 2012

⁶ vgl. Matthiesen et al. 2016b

⁷ vgl. Meboldt et al. 2012

⁸ vgl. Matthiesen 2019

Produktentwicklungsprozesses zu vermeiden und den frühen Erkenntnisgewinn zu ermöglichen.

Für den Produktentwickler ist der Validierungsprozess in der Produktentwicklung von Power-Tools⁹ aus zwei Perspektiven zu sehen, nämlich der subjektiven und der objektiven Perspektive¹⁰. Die subjektive Perspektive spiegelt sich in oft außer Haus durchgeführten Tests mit Kunden wider (siehe Bild 1-1 unterste Zeile). Das Ergebnis dieser subjektiven Tests stellt meist ein zentrales Arbeitsergebnis (Deliverable) dar, welches zum Durchschreiten des nächsten Gates im Produktentwicklungsprozess notwendig ist. Die objektive Perspektive spiegelt sich hingegen hauptsächlich in internen Tests wider, die während des gesamten Entwicklungsprozesses durchgeführt werden, sobald die erste Version des Power-Tools oder dessen Teilkomponenten physisch existiert (siehe Bild 1-1 zweite und dritte Zeile von unten).

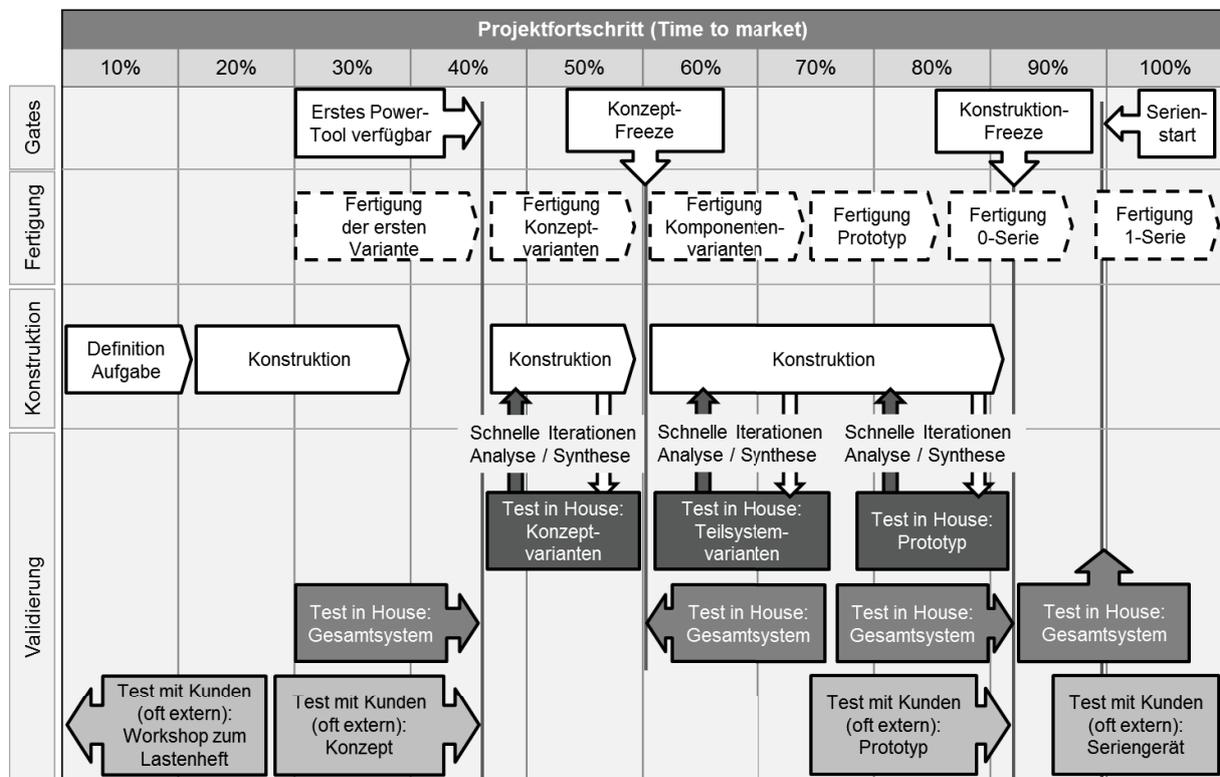


Bild 1-1: Validierungsphasen innerhalb eines beispielhaften Time-to-market Stage-Gate-Prozesses in der Power-Tool Entwicklung¹¹

Die durchgeführten Tests mit dem Kunden konzentrieren sich, neben der Lebensdauerprüfung im realen Umfeld, auf den erlebten Eindruck des Anwenders bei der Nutzung des Power-Tools. Die Testergebnisse beinhalten beispielsweise Aussagen zur Haptik, zum gewünschten Funktionsumfang, zur Preisfindung oder die

⁹ nach DIN EN 28662:1993-01 handgehaltene motorbetriebene Maschine, siehe Abschnitt 2.1

¹⁰ vgl. Matthiesen et al. 2018b

¹¹ in Anlehnung an Matthiesen et al. 2018b, S. 120 auf Basis von Matthiesen et al. 2016a, S. 96

subjektive Leistung des Elektrowerkzeugs im Vergleich zu Wettbewerbsprodukten. Ebenfalls werden hier Funktionsstörungen aufgedeckt die aus Anwendungen resultieren, welche nicht in den „In House“ durchgeführten Tests abgebildet werden. Die Informationen werden mit Hilfe von Testbenutzern in Testzentren oder durch Tests mit Schlüssel-Kunden beispielsweise auf Baustellen gewonnen. In frühen Phasen der Entwicklung können dies auch Fokus-Gruppen-Diskussionen mit Designmustern und skizzierten Leistungsversprechen bei potentiellen zukünftigen Kunden sein. Oft werden die Tests auch extern bei Marktforschungsinstituten in Auftrag gegeben. Diese subjektiven Tests erfordern meist eine Vielzahl verschiedener potentieller Käufer und Anwender, um einen breiten Überblick über die Wünsche des Kunden zu gewinnen.

Die internen Tests (objektive Sichtweise) innerhalb des Produktentwicklungsprozesses konzentrieren sich meist auf die Funktionalität und Lebenserwartung des Produkts in Testszenarien. Sie lassen sich nach MATTHIESEN ET AL.¹² weiter aufteilen:

- (1) Virtuelle und/oder physische Validierungsaktivitäten, die kontinuierlich und parallel zur Konstruktion durchgeführt werden, um den Reifegrad der Produktentwicklung festzustellen. Diese können bei nicht erreichtem Reifegrad zu frühen Iterationen und somit zu frühem Erkenntnisgewinn innerhalb des Produktentwicklungsprozesses führen (siehe Bild 1-1 dritte Zeile von unten). Hierbei wird Wissen oder Sicherheit gewonnen und späte teure Iterationen können vermieden werden.
- (2) Physische Validierungsaktivitäten vor Gates im Produktentwicklungsprozess und insbesondere im späten Produktentwicklungsprozess, die zu unerwünschten späten Iterationen führen, wenn zentrale Arbeitsergebnisse (Deliverables) verfehlt werden (siehe Bild 1-1 zweite Zeile von unten).

Der Zweck dieser beiden unterschiedlichen Validierungsaktivitäten weicht dabei stark voneinander ab.

Ziel der kontinuierlichen virtuellen und physischen Validierungsaktivitäten (1) ist es, Erkenntnisse über den Reifegrad des zu entwickelnden Produktes zu gewinnen und Handlungsbedarf innerhalb des Produktentwicklungsprozesses abzuleiten. Dabei werden zum Teil auch verschiedene Entwicklungsalternativen oder Entwicklungsgenerationen bezüglich der Zusammenhänge von Gestalt und Funktion des Produktes analysiert und miteinander verglichen¹³. Ziel der Tests ist der möglichst

¹² vgl. Matthiesen et al. 2018b

¹³ vgl. Matthiesen 2019

frühe Erkenntnisgewinn, um späte teure Iterationen zu vermeiden. Der zentrale Erfolgsfaktor dieser Validierungsaktivitäten sind konstante Testbedingungen zum Vergleich verschiedener Produktvarianten¹⁴.

Ziel der physischen Validierung vor Gates oder im späten Produktentwicklungsprozess (2) ist es hingegen herauszufinden, ob die gewünschte Produktfunktionalität mit unterschiedlichen Anwendern und Anwendungen unter Berücksichtigung der Komplexität und Unsicherheiten der realen Anwendung erreicht werden kann.

Bei Power-Tools interagieren der Anwender und das Werkstück während der Anwendung mit dem Power-Tool¹⁵. Das Werkstück kann im übertragenen Sinne hierbei auch, wie beispielsweise bei einem Bohrhammer, eine Betonwand sein. Die Subsysteme Anwender, Power-Tool und Werkstück bilden durch ihre Wechselwirkungen ein Gesamtsystem und beeinflussen die Funktion des Power-Tools¹⁶. Im Rahmen von Validierungsaktivitäten muss das Power-Tool somit in sein Gesamtsystem eingebunden betrachtet werden. Obwohl vielversprechende Ansätze zur Überprüfung von Teilfunktionen von Power-Tools unter Simulation des Gesamtsystems bestehen – wie beispielweise von MATTHIESEN ET AL.¹⁷ und MATTHIESEN ET AL.¹⁸ vorgestellt – werden Power-Tools zum großen Teil in manuellen Tests in Prüfräumen, wie in Bild 1-2 dargestellt, durch reale Anwender in einer abstrahierten Modellanwendung unter Anwendungsvorgaben wie beispielsweise Andruckkraft oder Schnittgeschwindigkeit getestet¹⁹. Innerhalb dieser manuellen Tests erfolgt unter Zuhilfenahme mehrerer Anwender, die mit dem Gerät arbeiten, der Abgleich zwischen den Ist- und Soll-Eigenschaften verschiedener Entwicklungsalternativen von Power-Tools. Hierbei können bis zu 5 Mann-Jahre Testaufwand in einem Entwicklungsprojekt mit einer Gesamtlaufzeit von 2 Jahren anfallen.

¹⁴ vgl. Matthiesen et al. 2016a

¹⁵ vgl. Matthiesen et al. 2018c auf Basis von Matthiesen et al. 2012

¹⁶ vgl. Matthiesen et al. 2012

¹⁷ vgl. Matthiesen et al. 2017a

¹⁸ vgl. Matthiesen et al. 2017b

¹⁹ vgl. Matthiesen et al. 2015



Bild 1-2: Typische Testumgebung zur Prüfung von Power-Tools mit Staubabsaugung²⁰

Die Testergebnisse lassen sich von den Produktentwicklern nicht immer einfach interpretieren, da die unbestimmten Benutzerinteraktionen nach HEYDEN ET AL.²¹ zu unklaren Testergebnissen führen können. Die Herausforderung wird an folgendem Beispielszenario nachvollziehbar: Eine neue, auf längere Laufzeit optimierte Version einer Komponente wird zusammen mit Komponenten, die aus einem Vorgängerprodukt übernommen wurden, auf Lebensdauer getestet. Im Test stellt sich heraus, dass die Lebensdauer geringer ist als bei der Vorgängerversion. Produktentwickler sind in diesem Szenario mit einer großen Unsicherheit konfrontiert. Entweder ist die optimierte Komponente, entgegen der Erwartung, schwächer als der Vorgänger oder die Wechselwirkungen zwischen Anwender, Power-Tool und Werkstück haben sich verändert. So könnten die Wechselwirkungen mit dem veränderten Anwender (oder durch andere nicht konstante Testbedingungen veränderte Wechselwirkungen) für die Lebensdauerverkürzung verantwortlich sein. Dieses unklare Testergebnis kann zu teuren Cross-Gate-Iterationen, wie diese von MEBOLDT ET AL.²² beschrieben werden, führen.

²⁰ Matthiesen et al. 2018c, S. 158

²¹ vgl. Heyden et al. 2018

²² vgl. Meboldt et al. 2012

Da die Benutzerinteraktion die Funktion von Komponenten beeinflusst, besteht ein entscheidender Erfolgsfaktor bei der Validierung darin, die Interaktionen innerhalb dieses Gesamtsystems so reproduzierbar wie möglich zu halten. Nach MATTHIESEN ist es hierbei jedoch wichtig, die Interaktion bzgl. des Validierungsergebnisses nicht unzulässig zu vereinfachen. Bei der Entwicklung werden nämlich stets zwei Anforderungen gleichzeitig an die Validierung gestellt: Reproduzierbarkeit und Realitätsnähe, auch wenn diese Anforderungen teils konträr zueinander stehen²³. Während das Teilsystem Werkstück in manuellen Tests in tolerierbaren Grenzen gehalten werden kann (konstante Qualität der Prüfmaterialien, vergleichbare Verbrauchsmaterialien usw.), ist die Interaktion zwischen Anwender und Power-Tool in manuellen Tests schwieriger zu kontrollieren. Zwar können Anteile der Wechselwirkungen, beispielsweise durch Handlungsanweisungen an das Versuchspersonal, bedingt kontrolliert werden, jedoch ist ein Teil der Wechselwirkungen nicht direkt vom Anwender beeinflussbar²⁴. Diese Wechselwirkungsanteile sind vom mechanisch-dynamischen Anwenderverhalten dominiert und lassen sich kaum konstant halten. Um anwenderinduzierte Unsicherheiten in kontinuierlichen physischen und virtuellen Validierungsaktivitäten innerhalb des Produktentwicklungsprozesses von Power-Tools zu reduzieren, ist der Einsatz von virtuellen und physischen Modellen zur Beschreibung der mechanisch-dynamischen Interaktionen zwischen Anwender und Power-Tool sinnvoll.

Diese Arbeit trägt zum Verständnis dieser Anwenderinteraktionen bei und liefert Ansätze zur Modellierung dieser Interaktionen in dynamisch gleichwertigen Systemen. Hierdurch werden die in der Entwicklung von Power-Tools kontinuierlich und parallel zur Konstruktion durchgeführten Validierungsaktivitäten unterstützt, die zu frühem Erkenntnisgewinn führen (siehe Bild 1-1: Iterationen zwischen Validierung und Konstruktion) und hierdurch späte kostenintensive Iterationen vermieden.²⁵

²³ vgl. Matthiesen 2019

²⁴ vgl. Matthiesen et al. 2016a

²⁵ Textteile des gesamten Abschnittes 1.1 wurden bereits in Matthiesen et al. 2018b und in Matthiesen et al. 2018c veröffentlicht

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in die in Bild 1-3 dargestellten acht Kapitel unterteilt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Kapitel 1: Einleitung

Kapitel 2: Grundlagen und Stand der Forschung

Kapitel 3: Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Kapitel 4: Forschungsdesign

Kapitel 5: Relevanz der passiven Anwendereigenschaften in manuellen Tests

Kapitel 6: Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschrauber

Kapitel 7: Modellierung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften am Impulsschrauber

Kapitel 8: Zusammenfassung und Ausblick

Bild 1-3: Übersicht über Aufbau und Struktur der Arbeit

In **Kapitel 2** werden die Grundlagen zu dieser Arbeit aufbereitet dargestellt. Der Stand der Forschung wird bezüglich der Beschreibung und Modellierung von Interaktionen zwischen Power-Tools und Anwendern zusammengefasst. Der Fokus liegt hierbei auf dem Anteil der Interaktionen, die nicht direkt vom Anwender beeinflussbar sondern durch die so genannten passiven Anwendereigenschaften²⁶ dominiert sind. Insbesondere wird auf die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften und die virtuelle und physische Modellierung der passiven Anwendereigenschaften eingegangen. Das Kapitel schließt mit einem zusammenfassenden Fazit, das die Forschungslücke aufzeigt.

Die in Kapitel 2 herausgearbeiteten Forschungslücken werden in **Kapitel 3** in die drei Hauptziele dieser Arbeit überführt. Um diese Ziele zu erreichen, wird in **Kapitel 4** ein Forschungsdesign in drei Phasen vorgestellt, dem jeweils konkrete Forschungsschritte überlagert sind. Zur Operationalisierung der Ziele werden in diesem Kapitel ebenfalls die Forschungsfragen abgeleitet, welche durch diese Arbeit beantwortet werden.

Die erste Forschungsfrage bezieht sich auf den Einfluss der passiven Anwendereigenschaften bei der Validierung von Power-Tools und wird in **Kapitel 5** dieser Arbeit am Beispiel eines Bohrhammers und Impulsschraubers beantwortet. Wesentlicher Kernpunkt ist die Beantwortung der Fragestellung, ob die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften zu veränderten Beanspruchungen in manuellen Tests führen kann.

²⁶ Die Definition folgt in Kapitel 2 selbst.

Im Rahmen von **Kapitel 6** wird eine Methode entwickelt, mit der sich die Varianz der passiven Anwendereigenschaften erstmals direkt am Power-Tool am Beispiel eines Impulsschraubers untersuchen lässt. Hierdurch wird die Grundlage zur Entwicklung von Ersatzmodellen zur Abbildung variierender passiver Anwendereigenschaften in Prüfständen für Impulsschrauber-ähnliche Power-Tools gelegt.

Kapitel 7 zeigt Möglichkeiten zur Realisierbarkeit eines physischen Modells auf, das die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in der Drehung zur Unterarmachse abbilden kann. Das Modell und die Methode zu seiner Entwicklung fokussieren hierbei auf die Interaktionen in Drehung zur Unterarmachse, wie sie am Beispielsystem Impulsschrauber auftreten.

Im abschließenden **Kapitel 8** wird die Arbeit zusammenfassend dargestellt. Weiter gibt das Kapitel einen Ausblick über mögliche Folgearbeiten vor dem Hintergrund aufgeworfener Fragestellungen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Das Super-System Power-Tool

Innerhalb dieser Arbeit bezeichnet der Begriff Power-Tool eine Arbeitsmaschine / Werkzeugmaschine, welche durch die mechanische Wechselwirkung mit dem Anwender im Kraftfluss eine Arbeitsaufgabe erfüllt, bei der etwas bewirkt, bearbeitet oder hergestellt wird. Der Begriff Power-Tool wird nachfolgend in dieser Arbeit für die Untergruppe der handgehaltenen Power-Tools²⁷ (beispielsweise Bohrhämmer und Schrauber) genutzt. Bei diesen besteht eine direkte und permanente mechanische Wechselwirkung zwischen Anwender und Power-Tool an dem oder den Griffen. Neben dieser besteht bei den meisten handgehaltenen Power-Tools auch eine mechanische Wechselwirkung zwischen dem Werkstück und dem Power-Tool. Das Werkstück kann hierbei im übertragenen Sinne - beispielsweise bei einem Bohrhämmer oder Schrauber - auch als Betonwand oder Schraubenverbindung verstanden werden. Ausnahmen hierfür sind beispielsweise Power-Tools die Fluide abstrahlen (wie beispielsweise Hochdruckreiniger oder Farbsprühsysteme) oder solche, die nur kurzzeitig und demnach nicht permanent wechselwirken (wie beispielsweise Nagelgeräte). Hier ist die Wechselwirkung zwar nicht permanent mechanisch, aber dennoch zumindest funktional vorhanden. Im Allgemeinen lässt sich somit das in Bild 2-1 dargestellte Super-System „Power-Tool“ definieren, welches eine funktionale Einheit bildet.



Bild 2-1: Das Super-System „Power-Tool“²⁸

²⁷ im Sprachgebrauch der DIN EN 28662:1993-01 handgehaltene motorbetriebene Maschine

²⁸ Matthiesen et al. 2018c, S. 158 auf Basis von Matthiesen et al. 2014, S. 194

Die Hauptfunktion des Power-Tools entsteht in diesem Super-System in einer Anwendung. Ein Beispiel für eine solche Anwendung kann sein: „Anziehen eines Radbolzens zur Fixierung eines Autorades mittels Impulsschrauber“. Die Funktion des Super-Systems kommt erst dann zustande, wenn Anwender, Power Tool und Werkstück zusammenwirken und die erzeugte Vorspannung den Anforderungen der Schraubverbindung genügt. Offensichtlich wird die Funktion des Super-Systems in dieser Anwendung davon abhängen, ob der Anwender beispielsweise die Einstellungen am Gerät korrekt wählt und der Steckschlüsseinsatz (Stecknuss) zur Schraube passt. Neben diesen offensichtlichen Einflussfaktoren auf die Funktion existieren aber auch Wechselwirkungen im System, die die Gesamtfunktion beeinflussen, jedoch nicht offensichtlich sind. MATTHIESEN ET AL. konnten feststellen, dass die erzeugte Vorspannkraft in einer Schraubenverbindung, die mit einem Impulsschrauber angezogen wird, von der Greifkraft²⁹ des Anwenders abhängt. Sie zeigten auf, dass mit sinkender Greifkraft des Anwenders die Vorspannkraft in der Schraubverbindung tendenziell steigt. Diesen Einfluss führten sie auf die veränderten mechanisch-dynamischen Wechselwirkungen zwischen Impulsschrauber und Anwender zurück.³⁰ Diese mechanisch-dynamischen Wechselwirkungen ergeben sich aus einem Zusammenspiel der Bewegungstendenzen des Power-Tools und dem passiven Anwenderverhalten.

2.2 Grundlagen zu Bohrhämmern und Impulsschraubern

Bohrhämmer und Impulsschrauber sind im Sinne der Definition in Abschnitt 2.1 Power-Tools. Beide Systeme wechselwirken durch stoßhaltige Schwingungen mit dem Anwender. Bei Bohrhämmern findet diese durch Schwingung induzierte Wechselwirkung zu großen Teilen entlang der Bohrachse statt, während Impulsschrauber hauptsächlich durch um die Drehachse auftretende Schwingungen mit dem Anwender wechselwirken. Beiden Systemen ist gemein, dass die Anregung des Hand-Arm Systems mit großen Amplituden und Frequenzen weit unterhalb 100 Hz stattfindet. Wie später festgestellt wird, ist die Armhaltung eine relevante Versuchsgröße in dieser Arbeit. Nach DONG ET AL.³¹ ist insbesondere unter 100 Hz eine Vibrationsleitung in den Arm hinein zu erwarten, während Frequenzen oberhalb auf die Übertragung in Finger, Hand und Handgelenk begrenzt sind. Da ein Teil der Untersuchungen bei verschiedenen Armhaltungen in zwei Anregungsrichtungen erfolgen soll, sind die Geräte für die vorliegende Arbeit besonders geeignet und werden im Folgenden technisch in Ihrer Grundfunktion beschrieben.

²⁹ Definition siehe Abschnitt 2.3.5.2

³⁰ vgl. Matthiesen et al. 2014

³¹ vgl. Dong et al. 2001

2.2.1 Grundlagen zu Bohrhämmern

Bild 2-2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines pneumatischen Schlagwerkes, der Kernkomponente eines Bohrhammers.

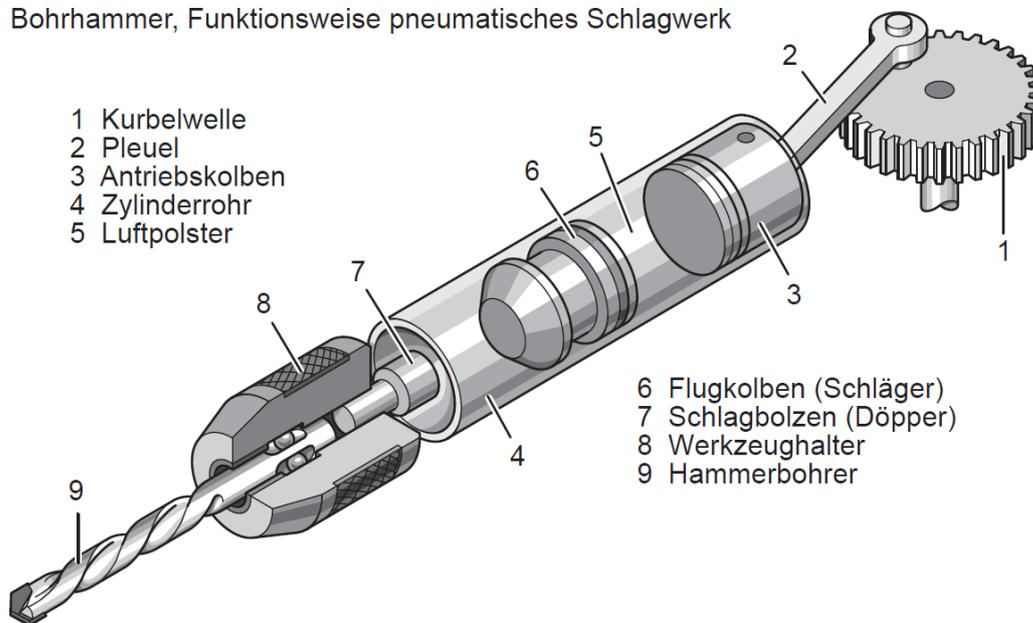


Bild 2-2: Prinzipieller Aufbau eines Bohrhammers³²

Das Schlagwerkprinzip ist hierbei in den meisten Bohrhämmern gleich aufgebaut. Das Prinzip der Erzeugung der linearen Bewegung variiert zwischen den verschiedenen Herstellern und Modellen. Durch die Kurbelwelle (1) wird eine Rotationsbewegung eines Elektromotors über den Pleuel (2) in eine Linearbewegung gewandelt. In einem Zylinderrohr (4) treibt der Pleuel dabei einen Antriebskolben (3) periodisch schwingend zu einer Vorwärts- und Rückwärtsbewegung an. Im Zylinderrohr befindet sich ein frei geführter Flugkolben (6). Zwischen Antriebskolben und Flugkolben baut sich ein Überdruck (5) auf, der den Flugkolben in Richtung Schlagbolzen (7) beschleunigt. Der Flugkolben trifft auf den Schlagbolzen auf und übergibt den Impuls über den Schlagbolzen auf den Hammerbohrer (9). Der Flugkolben prallt zurück, während der Antriebskolben ebenfalls in rückwärtiger Bewegung ist. Es baut sich ein Unterdruck (5) auf, der den Flugkolben zurückzieht. Bevor der Flugkolben den hinteren Umkehrpunkt erreicht, geht der Antriebskolben wieder in eine Vorwärtsbewegung über. Hierdurch wird ein Überdruck aufgebaut, welcher den Flugkolben zunächst bremst und anschließend wieder in Richtung Schlagbolzen beschleunigt. Durch den Druckaufbau innerhalb des Zylinderrohrs wirken periodische Kräfte in der Achse des Bohrhammers, welche zu mechanisch-dynamischen Wechselwirkungen zwischen Power-Tool und

³² Schweizer 2004, S. 7

passivem Verhalten des Anwenders führen. Überlagert zu diesen Kräften in der Achse des Bohrhammers treten Momente um die Achse auf, welche aus der Reibung des sich drehenden Bohrers in der Wand resultieren. Diese führen zu einer Anregung in einer Drehung zur Unterarmachse des Anwenders. Die Anregung kann hierbei stochastische Ereignisse aufweisen, die beispielsweise von einem Verklemmen des Bohrers an einer Eisenarmierung resultieren.

2.2.2 Grundlagen zu Impulsschraubern

Der Impulsschrauber bildet die Weiterentwicklung des Schlagschraubers, um die Vorteile des kleinen Abstützmomentes des Anwenders bei hohen erzeugbaren Momenten mit der Genauigkeit eines kontinuierlichen Anzugsverfahrens zu kombinieren. Die Erhöhung der Genauigkeit wird hierbei durch den Einsatz einer ölhydraulischen Impulszelle erzielt, die den metallischen Stoßvorgang im Schlagschrauber durch weichere Impulse ersetzt.

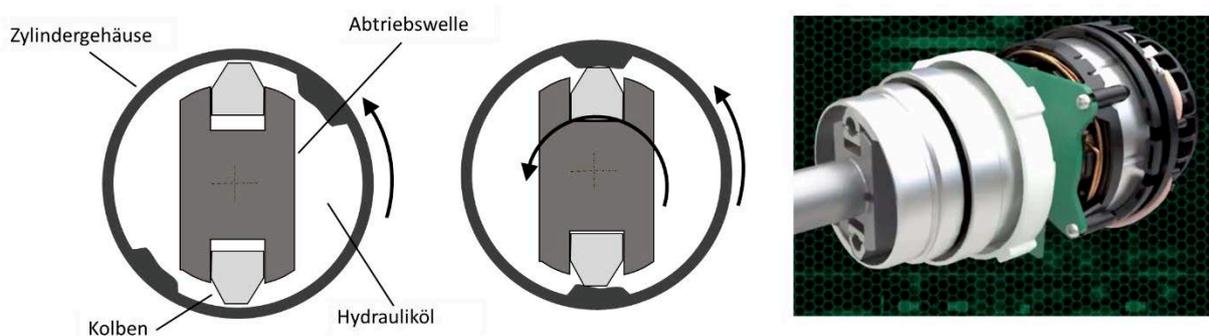


Bild 2-3: Prinzipieller Aufbau einer Impulszelle eines Impulsschraubers³³

Der prinzipielle Aufbau der Impulszelle ist in Bild 2-3 dargestellt. Das vom Motor angetriebene Zylindergehäuse ist mit Hydrauliköl gefüllt. Durch die Drehung des Zylinders dichten die radial beweglichen Kolben in zwei definierten relativen Lagen zwischen Abtriebswelle und Zylinder (jeweils 180° versetzt) gegen die Zylinderwand ab (Erhebungen am Innendurchmesser des Zylindergehäuses). In den dazwischenliegenden Relativstellungen zwischen Zylindergehäuse und Abtriebswelle kann keine Abdichtung stattfinden und das Öl kann die Kolben überströmen. In den abdichtenden Relativlagen ergeben sich zwei Druckkammern in denen der Druck ansteigt. Als Konsequenz wirkt seitlich auf die Kolben eine Kraft, die zu einem Moment auf der Abtriebswelle führt. Falls das sich ergebende Moment ausreicht, rotiert die Abtriebswelle. Bei zu großem nötigen Moment an der Abtriebswelle dreht sich das Zylindergehäuse relativ zur Abtriebswelle weiter. Eine erneute Abdichtung durch die Kolben findet nach einer halben Relativumdrehung zwischen Zylindergehäuse und

³³ MakitaCorporation 2016 (nur rechtes Bild)

Abtriebswelle statt. Das Zylindergehäuse kann während dieser halben Umdrehung Drehenergie aufbauen, welche dann bei einer neuen Abdichtlage als Momentüberhöhung vorliegt. In Reaktion zum entstehenden Moment auf der Abtriebswelle wirkt periodisch (zweimal pro Relativumdrehung zwischen Zylindergehäuse und Abtriebswelle) ein Moment um die Drehachse des Impulsschraubers und somit um die Unterarmachse des Anwenders. Dieses Moment führt zu einer Drehbewegung, welche zu den mechanisch-dynamischen Wechselwirkungen zwischen dem passiven Anwenderverhalten und dem Power-Tool führt.

2.3 Die passiven Anwendereigenschaften

2.3.1 Definition der passiven Anwendereigenschaften

„Der Bereich aktiver haptischer Interaktion - Bewegungen, die bewusst oder unbewusst vom Menschen ausgeführt werden – sind [sic] in der Bandbreite begrenzt.“³⁴

Die Interaktion eines Anwenders mit einem haptischen Gerät setzt sich nach MATYSEK UND KERN demnach

„[...] aus einem bewussten, bandbreitenbegrenzten Anteil zusammen - der aktiven haptische [sic] Interaktion - sowie einem passiven Anteil, der aus den mechanischen Eigenschaften der Finger, Haut und Knochen besteht. Der Einfluss dieses Anteils erstreckt sich über den gesamten Frequenzbereich, ist aber vor allem für hohe Frequenzen relevant.“³⁵

MATYSEK UND KERN³⁶ definieren den Übergangsbereich zwischen dem aktiven Anteil der haptischen Interaktion und dem rein passiven Anteil bei einer Frequenz der Schwingung an der Kontaktstelle zwischen Anwender und Geräteoberfläche von 10 Hz. Dies führen sie auf Untersuchungen im Stand der Forschung zurück, in denen die schnellste bewusste Bewegung des Menschen bei bis zu 8 Hz festgestellt wurde. Der aktive Anteil der haptischen Interaktion wird aus Wahrnehmung von Kräften und Nutzerreaktion in Form von gesteuerten Bewegungen über die Muskeln definiert. Der passive Anteil der Interaktionen wird durch den Nutzer als mechanische Last

³⁴ Matysek und Kern 2009, S. 66

³⁵ Matysek und Kern 2009, S. 69

³⁶ vgl. Matysek und Kern 2009

dominiert. Diese Last kann als mechanische Admittanz des Menschen oder deren Kehrwert, die mechanische Impedanz des Menschen aufgefasst werden.³⁷

Die mechanische Impedanz \underline{Z} (in der Literatur und im Stand der Forschung oft auch als MI abgekürzt) lässt sich dabei nach DONG ET AL.³⁸ durch das an der Schwingungseinleitungsstelle der Hand gemessene, von der Frequenz ω abhängige, Verhältnis der Kraft $\underline{F}(\omega)$ zur Auslenkungsgeschwindigkeit $\underline{\dot{x}}(\omega)$ ausdrücken. Die Impedanz ist dann als komplexe Größe definiert zu:

$$\underline{Z}(\omega) = \frac{\underline{F}(\omega)}{\underline{\dot{x}}(\omega)} \quad \text{Gl. 2-1}$$

Ebenfalls im Stand der Forschung gebräuchlich ist hierbei der Begriff der scheinbaren Masse $\underline{M}(\omega)$ (oft auch als AM abgekürzt) wobei gilt:

$$\underline{Z}(\omega) = \underline{M}(\omega) \cdot j \cdot \omega \quad \text{mit} \quad \underline{M}(\omega) = \frac{\underline{F}(\omega)}{\underline{\dot{x}}(\omega)} \quad \text{und} \quad j^2 = -1 \quad \text{Gl. 2-2}$$

Hohe Impedanzen lassen sich dabei begreifen als:

- „ 1. *Hart und steif im Sinne einer Federsteifigkeit,*
2. *träge im Sinne einer hohen Massenträgheit,*
3. *schwergängig im Sinne einer hohen Reibung.*“³⁹

Der Begriff der Impedanz lässt sich nach MATYSEK UND KERN auch für die Rotationen als Verhältnis zwischen Moment $\underline{T}(\omega)$ und Winkelgeschwindigkeit $\underline{\dot{\theta}}(\omega)$ um eine Achse definieren:

$$\underline{Z}_r(\omega) = \frac{\underline{T}(\omega)}{\underline{\dot{\theta}}(\omega)} \quad \text{Gl. 2-3}$$

2.3.2 Messung der Impedanz

Zur Bestimmung der mechanischen Impedanz wird entsprechend dem Stand der Forschung die entstehende Kraft zwischen Hand und Griff, welche durch eine periodische Bewegung hervorgerufen wird, zusammen mit einer Bewegungsgröße zeitgleich gemessen. Zur Ermittlung der notwendigen Größen werden Schwingungs-Anreger-Systeme genutzt, die einen Griff mit einem breiten Spektrum an Frequenzen beaufschlagen können. An diesem Griff greift der zu untersuchende Proband an,

³⁷ vgl. Matysek und Kern 2009

³⁸ vgl. Dong et al. 2005

³⁹ Matysek und Kern 2009, S. 69

während die Frequenz der Anregung verändert wird. Eine exemplarische Untersuchungsumgebung ist in Bild 2-4 dargestellt.

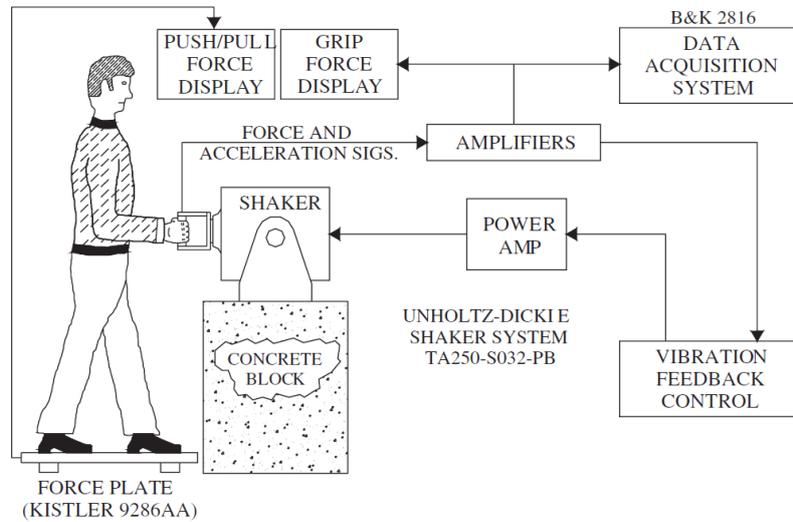


Bild 2-4: Schematischer Aufbau eines Messsystems zur Erfassung der Impedanz des Hand-Arm Systems in einer Achse⁴⁰

Am Griff zum Anwender wird sowohl die summierte Kraft zwischen Griff und Hand, als auch eine Bewegungsgröße des Griffs (meist die Beschleunigung) zeitgleich in Betrag und Phase erfasst. Die summierte Kraft zwischen Anwender und Boden wird ebenfalls gemessen, um eine Aussage über die Andruckkräfte des Anwenders zu erlangen. Zusätzlich wird durch einen zweigeteilten Griff, wie dieser beispielhaft in Bild 2-5 dargestellt ist, die Greifkraft des Nutzers gemessen.

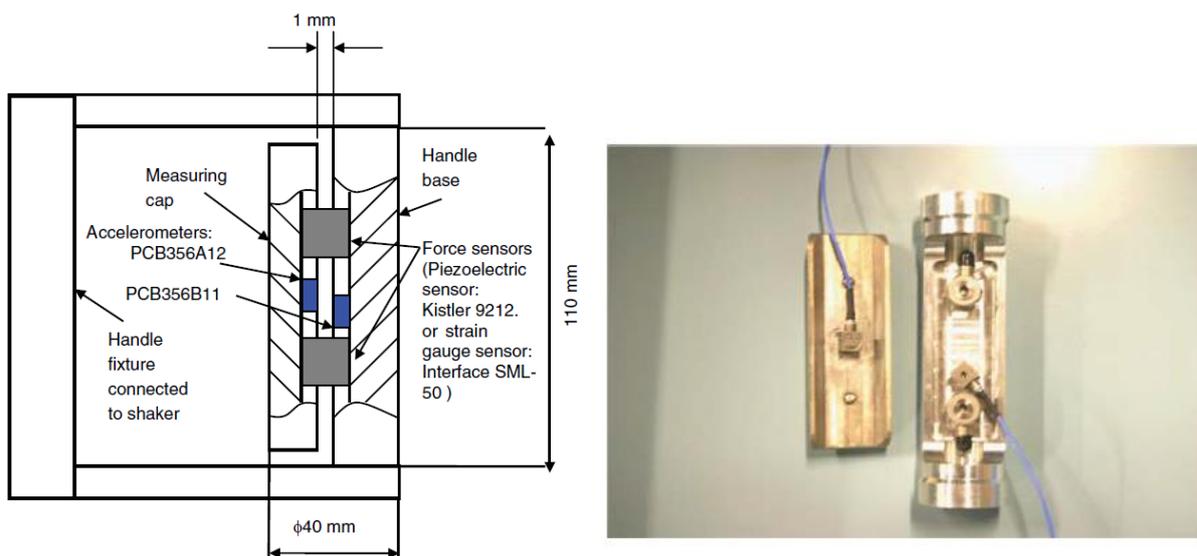


Bild 2-5: Prinzip-Bild (links) eines Messgriffs zur Erfassung der Impedanz des Hand-Arm Systems und Bild eines realen Aufbaus (rechts)⁴¹

⁴⁰ Dong et al. 2006b, S. 811

⁴¹ Dong et al. 2006b, S. 812 (modifizierte Abbildung)

Sowohl Andruck- als auch Greifkraft werden dem Nutzer auf einem Display angezeigt, damit er diese nach Vorgaben des Versuchs beeinflussen kann. Beispielhaft für Untersuchungen mit ähnlich aufgebauten Messsystemen seien die Untersuchungen von MARCOTTE ET AL.⁴² und ALDIEN ET AL.⁴³ für translatorische Anregungsrichtungen genannt. Untersuchungen zur Impedanz der Hand, aufgeteilt in Handballen und Finger, wurden beispielsweise von DONG ET AL.⁴⁴ mit einem modifizierten Messgriff an einem ähnlich aufgebauten Messsystem durchgeführt. Eine Untersuchungsumgebung zur gleichzeitigen Anregung des Hand-Arm Systems in drei translatorischen Achsen wurde von DONG ET AL.⁴⁵ vorgestellt und ist in Bild 2-6 dargestellt.

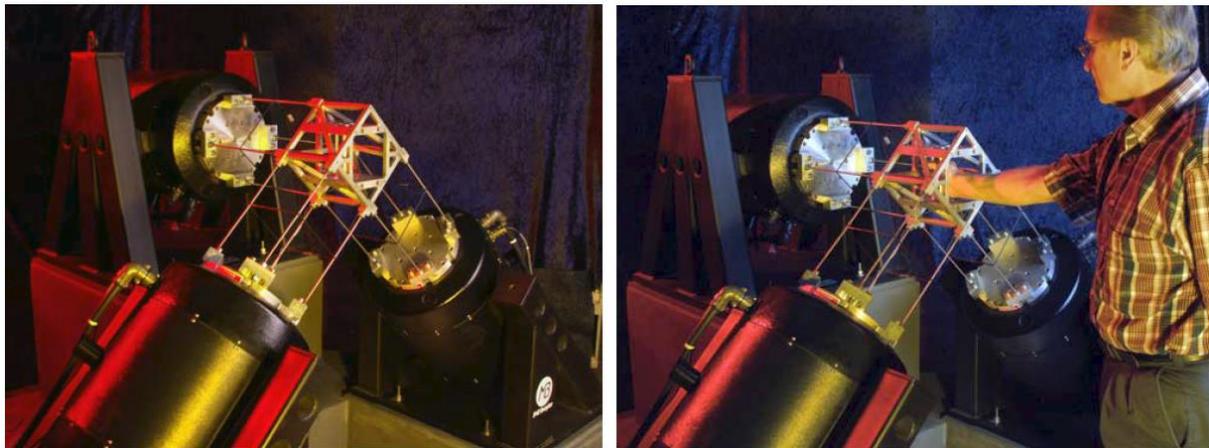


Bild 2-6: Messsystem zur Erfassung der Impedanz des Hand-Arm Systems in drei translatorischen Achsen⁴⁶

MATTHIESEN ET AL.⁴⁷ stellen das in Bild 2-7 dargestellte Schwingungs-Anreger-System vor. Das Messsystem soll erstmals die Erfassung der passiven Anwendereigenschaften in unterschiedlichen Arbeitshaltungen des Menschen bei einer rotatorischen (angularen) Anregung ermöglichen. Bisher liegen jedoch noch keine im Stand der Forschung verfügbaren Erkenntnisse vor.⁴⁸

⁴² vgl. Marcotte et al. 2005

⁴³ vgl. Aldien et al. 2006

⁴⁴ vgl. Dong et al. 2012

⁴⁵ vgl. Dong et al. 2006a

⁴⁶ Dong et al. 2006a, S. 1638

⁴⁷ vgl. Matthiesen et al. 2018a

⁴⁸ Die am IPEK – Institut für Produktentwicklung entstandene Versuchseinrichtung zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften in variierender Haltung unter Drehanregung basiert auf den Arbeiten des Autors und befindet sich zurzeit in der Inbetriebnahme

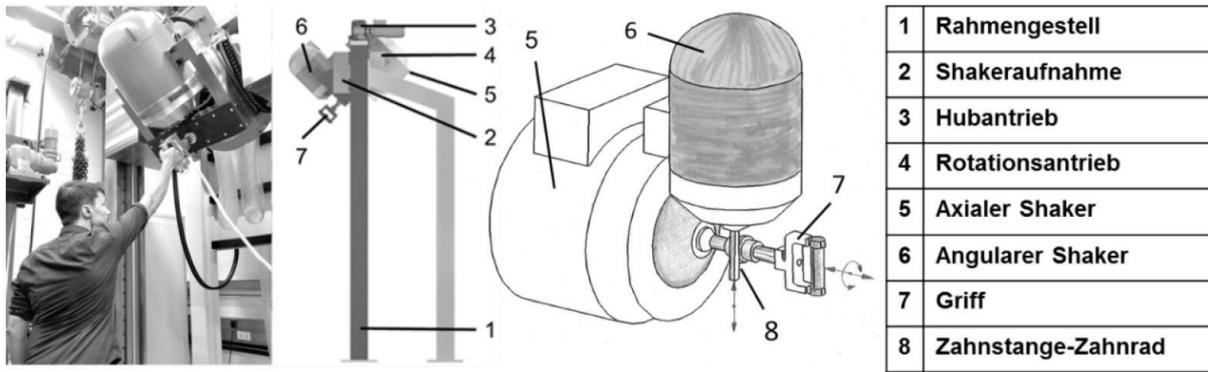


Bild 2-7: Messsystem zur Erfassung der Impedanz des Hand-Arm Systems in Translations- und Rotationsrichtung⁴⁹

Eine sehr detaillierte Darstellung der notwendigen Methoden zur Bestimmung der Impedanz mittels solcher Schwingungs-Anreger-Systeme unter Betrachtung der Leerimpedanz des Griffes und dem allgemeinen Übertragungsverhalten solcher Systeme gibt DONG ET AL.⁵⁰. Da diese Methoden im direkten Kontext dieser Arbeit weiter entwickelt werden, sei an dieser Stelle für eine detailliertere Betrachtung auf Abschnitt 6.1 verwiesen.

2.3.3 Definition der Koordinatensysteme

Entscheidend für die Berechnung bzw. Vergleichbarkeit der Impedanz ist, auf welches Koordinatensystem sich diese bezieht. EN ISO 5349-1:2001-12 beschreibt zwei Koordinatensysteme für das Hand-Arm System. Zum einen das biodynamische Koordinatensystem mit dem Ursprung im Kopf des dritten Mittelhandknochens. Zum anderen wird das basiszentrische Koordinatensystem dargestellt, welches geräte- bzw. griffbezogen ist. Nach DONG ET AL.⁵¹ werden verschiedene biodynamische Koordinatensysteme, die in Bild 2-8 beschrieben sind, für die Analyse des biodynamischen Systems sowie der Armhaltung eingesetzt. Die Beschreibung der Sensorik in einem Messgriff erfolgt aber meist im basiszentrischen System. DONG ET AL. weisen auf die Problematik hin, dass das basiszentrische Koordinatensystem oft bzgl. des Ursprungs nicht ausreichend beschrieben ist und es deshalb in anderen Normen und Veröffentlichungen unterschiedlich interpretiert wird. Des Weiteren gehen DONG ET AL. auf die Herausforderung der Vergleichbarkeit ein, wenn sich aufgrund der Griffdicke bzw. Grifforientierung die Koordinatenursprünge und -orientierung ändern.

⁴⁹ Matthiesen et al. 2018a, S. 98

⁵⁰ vgl. Dong et al. 2006b

⁵¹ vgl. Dong et al. 2015

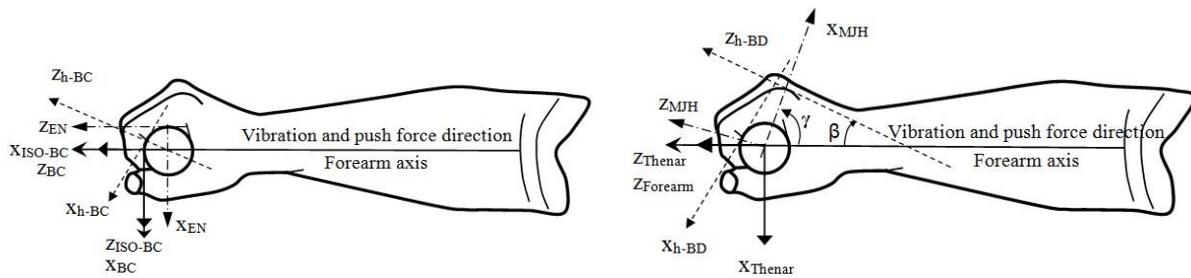


Bild 2-8: Visuelle Darstellung der unterschiedlichen basiszentrierten und biodynamischen Koordinatensysteme aus Normen und Veröffentlichungen. Abkürzungen: BC, basicentric; BD, biodynamic; h-BC, hand basicentric; h-BD, hand biodynamic; MJH, metacarpal joint head⁵²

Für die Simulation in der Produktentwicklung von Geräten ist die Wahl des Koordinatensystems sehr relevant, da die Impedanz in den meisten Fällen in einem basiszentrischen Koordinatensystem benötigt wird, welches im Griff liegt und zur Geräteachse orientiert ist. Es ist somit für jedes Gerät nötig, die Impedanz durch eine Koordinatentransformation in das passende Koordinatensystem zu übersetzen.

2.3.4 Darstellungsformen für die Impedanz

Die komplexe Größe Impedanz $\underline{Z}(\omega)$ lässt sich über den Realteil \Re und den Imaginärteil \Im mit Gl. 2-4 und Gl. 2-5 in Betrag $|\underline{Z}(\omega)|$ und Phase $\angle \underline{Z}(\omega)$ des Hand-Arm Systems zerlegen.

$$|\underline{Z}(\omega)| = \sqrt{\Re(\underline{Z}(\omega))^2 + \Im(\underline{Z}(\omega))^2} \quad \text{Gl. 2-4}$$

$$\angle \underline{Z}(\omega) = \tan^{-1} \frac{\Im(\underline{Z}(\omega))}{\Re(\underline{Z}(\omega))} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Der über der Frequenz dargestellte Betrag- und Phasenverlauf bildet eine etablierte Möglichkeit, die mechanische Impedanz zu visualisieren. In Bild 2-9 ist links qualitativ der Betrag der Impedanz über der Frequenz für die Anregung in Richtung der Unterarmachse (schwarze Strich-Punkt Kurven) und für die Richtung quer hierzu und der Griffachse (graue durchgezogene Kurven) dargestellt. Rechts ist in gleicher Weise die Phase der Impedanz aufgetragen.

⁵² Dong et al. 2015, S. 166

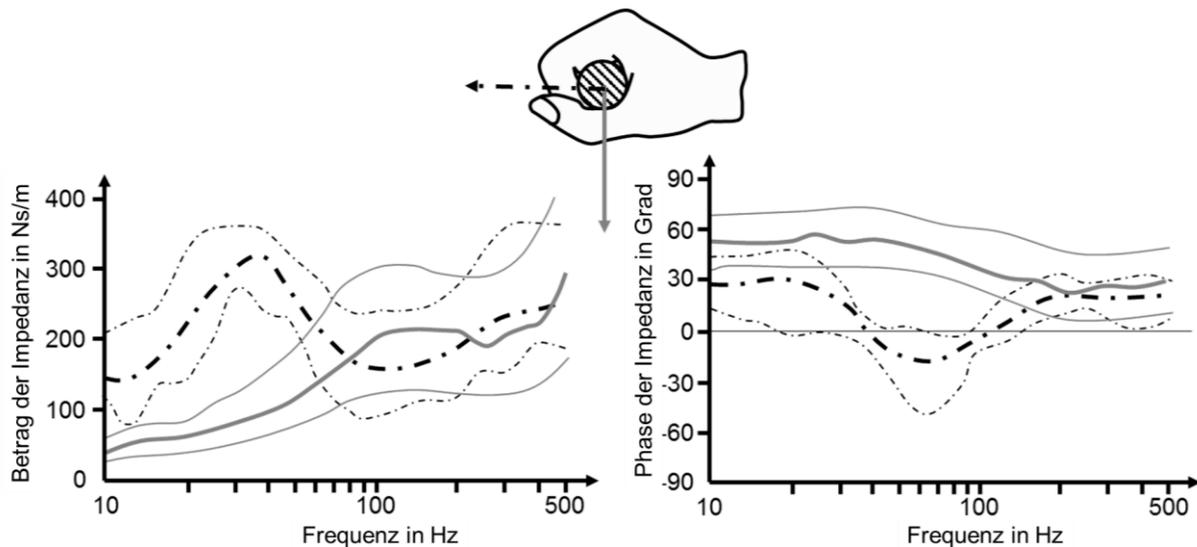


Bild 2-9: Impedanz des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase über der Anregungsfrequenz in Richtung der Unterarm-Achse (Strich-Punkt Linie) und senkrecht zur Griff- und Unterarm-Achse (durchgezogene Linie) nach ISO 10068:2012-12⁵³

Die mittleren Kurven (stärkere Linie) bilden dabei jeweils die mittlere Impedanz über der Frequenz aller herangezogenen Untersuchungen. Die beiden einhüllenden Kurven bilden jeweils die obere und untere gemessene Grenze der in der ISO 10068:2012-12 herangezogenen Untersuchungen. Es ist klar ersichtlich, dass die Impedanz sowohl in Betrag als auch Phase einer hohen Streuung unterworfen ist, die auf unterschiedliche Einflussfaktoren und variierende Versuchsbedingungen zurückzuführen ist. Ebenfalls ist deutlich zu erkennen, dass die Impedanz stark von der Anregungsrichtung der Hand abhängt.

2.3.5 Einflussfaktoren auf die Impedanz

2.3.5.1 Allgemeine Einflussfaktoren

Die passiven Anwendereigenschaften sind von mehreren Einflussfaktoren abhängig, die im Stand der Forschung bezüglich der translatorischen Anregung ausführlich untersucht wurden. Eine tiefe Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften bei rotatorischen Schwingungsanregungen fehlt bislang. Aufgrund der physikalischen Wirkzusammenhänge ist im ersten Ansatz von ähnlichen Einflussfaktoren auf die passiven Anwendereigenschaften bei rotatorischen Schwingungsanregungen auszugehen, auch wenn die Stärke der Einflussfaktoren natürlich völlig verschieden sein kann. Zusammengefasst ergeben sich nach ISO 10068:2012-12 und DIN 45677:2001-01 folgende Haupteinflussfaktoren:

- Vibrationsrichtung im Bezug zum Hand-Arm System

⁵³ Matthiesen et al. 2016a, S. 98 (modifizierte Abbildung)

- Griffgeometrie
- Beschleunigungsamplitude aufgrund der nichtlinearen Gewebeeigenschaften
- Anwenderkräfte, die auf den Griff aufgebracht werden (Greif- und Andruckkraft)
- Hand- und Armhaltung
- Individuelle Unterschiede durch Gewebeeigenschaften und anthropometrische Charakteristik des Hand-Arm Systems sowie die Konstitution des Anwenders

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf den Einfluss und die Veränderung der passiven Anwendereigenschaften an Beispielsystemen. Durch diese Beispielsysteme wird die Vibrationsrichtung im Bezug zum Hand-Arm System, die Griffgeometrie und die Beschleunigungsamplitude vorgegeben. In diesem Abschnitt werden die Erkenntnisse bzgl. der Haupteinflussfaktoren im Stand der Forschung auf solche Haupteinflussfaktoren beschränkt, die anwenderseitig beeinflussbar sind. Die angegebenen Quellen weisen auch einschlägige Aussagen bzgl. der hier nicht betrachteten Faktoren auf und können bei Bedarf herangezogen werden.

Die ISO 10068:2012-12 empfiehlt bei der Bestimmung der Gesamtimpedanz eines Menschen bei zweihändiger Bedienung eines Power-Tools die einfache Verdopplung der Impedanzen. Untersuchungen von KINNE⁵⁴ zeigen jedoch, dass die dominante Hand eines Probanden (rechte Hand bei Rechtshändern) eine andere Impedanz aufweist als die nichtdominante Hand. Die nachfolgenden Aussagen gelten demnach immer nur für eine Hand, da im derzeitigen Stand der Forschung keine Einigkeit über die passiven Anwendereigenschaften bei einer Zweihandbedienung besteht.

2.3.5.2 Greif- und Andruckkraft des Anwenders

Beim Kontakt des Anwenders mit einem Griff werden Andruckkraft und Greifkraft unterschieden. Diese lassen sich über den in Bild 2-10 visualisierten Kontaktdruck definieren.

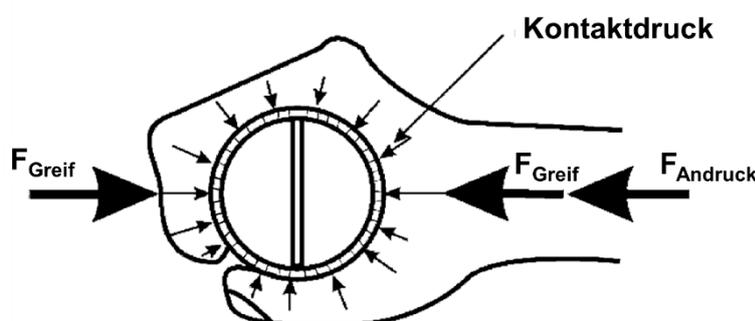


Bild 2-10: Greif- und Andruckkraft auf Basis des Kontaktdrucks⁵⁵

⁵⁴ vgl. Kinne 2012

⁵⁵ Welcome et al. 2004, S. 508 (modifizierte Abbildung)

Die Andruckkraft ist nach DIN 45679:2013-02 die Kraft, die bei vektorieller Summation aller Druckkräfte auf den infinitesimalen Kontaktflächen zwischen Hand und Griff wirkt. Die Greifkraft entspricht der Hälfte der Differenz aus der Betragssummation aller Druckkräfte minus der Andruckkraft. Unschärfer beschrieben ist die Greifkraft die zangenartige Kraft, die am Griff wirkt und die Andruckkraft die Kraft, die zwischen Füßen und Boden in Andruckrichtung wirkt.

In Bild 2-11 ist der Einfluss der Greifkraft auf die gemessene Impedanz des Anwenders in der in dieser Arbeit besonders relevanten x_h -Richtung (siehe Bild 2-8) dargestellt. GURRAM ET AL.⁵⁶ führten die Untersuchungen neben dieser Richtung auch in den beiden verbleibenden translatorischen Richtungen durch. Es wurden die Impedanzen bei drei Greifkräften (10, 25 und 50 N) an einem runden Griff aufgenommen.

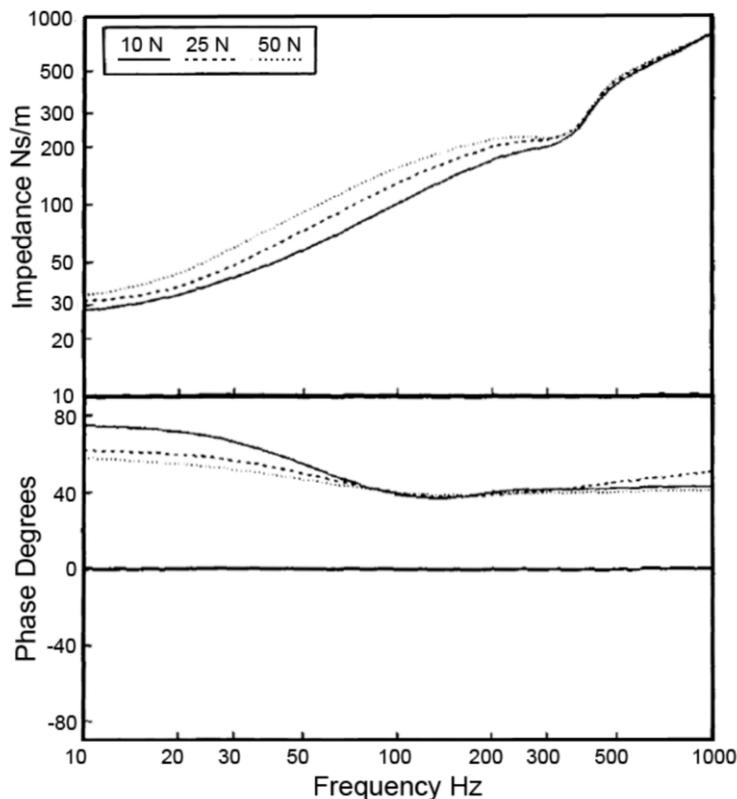


Bild 2-11: Der Einfluss der Greifkraft auf die gemessene Impedanz des Anwenders nach GURRAM ET AL. in x_h -Richtung⁵⁷

Aus den Daten ist ersichtlich, dass eine Erhöhung der Greifkraft mit einer Erhöhung des Betrages der Impedanz einhergeht. Zeitgleich sinkt die Phase der Impedanz ab. Die Auswirkung stellt sich über den Frequenzbereich bis 100 Hz fast gleichbleibend

⁵⁶ vgl. Gurram et al. 1995b

⁵⁷ Gurram et al. 1995b, S. 141 (modifizierte Abbildung)

dar. Danach verringert sich der Einfluss der Greifkraft. Zu ähnlichen Erkenntnissen kommen auch die Untersuchungen von BURSTRÖM⁵⁸.

In Bild 2-12 ist der Einfluss der Andruckkraft auf die von MARCOTTE ET AL.⁵⁹ angegebene scheinbare Masse des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase für drei Andruckkräfte (80, 120 und 160 N) dargestellt.

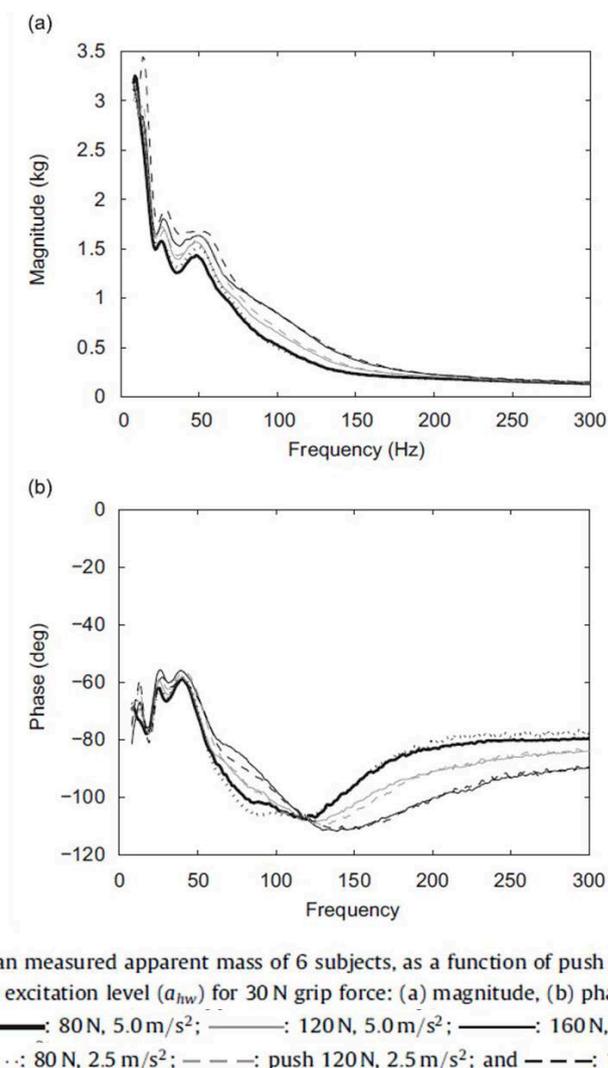


Bild 2-12: Der Einfluss der Andruckkraft auf die gemessene scheinbare Masse des Anwenders in z_h -Richtung nach MARCOTTE ET AL.⁶⁰

Der Einfluss der Andruckkraft auf den Betrag der gemessenen scheinbaren Masse ist auf den Bereich zwischen 20 und 200 Hz begrenzt. Bei steigender Andruckkraft steigt die scheinbare Masse leicht. Unterhalb 20 Hz ist der Einfluss auf Betrag und Phase

⁵⁸ vgl. Burström 1997

⁵⁹ vgl. Marcotte et al. 2010

⁶⁰ Marcotte et al. 2010, S. 1974

klein und uneinheitlich. Die Phase der scheinbaren Masse folgt frequenzunabhängig keiner einheitlichen Logik über den gesamten Frequenzbereich.

Von MARCOTTE ET AL.⁶¹ wurden Versuche zur Beeinflussbarkeit der passiven Anwendereigenschaften mit verschiedenen Kombinationen aus Greif- und Andruckkraft durchgeführt. Anhand der in Bild 2-13 dargestellten Ergebnisse kommen sie zu dem Schluss, dass unter den gleichen Versuchsbedingungen sowohl Greif- als auch Andruckkraft die Impedanz des Anwenders verändern. Bei einem Anstieg der Greif- oder der Andruckkraft erhöht sich der Betrag der Impedanz in z_h -Richtung ab etwa 25 Hz. Ab etwa 200 Hz hat die Andruckkraft jedoch nur noch wenig Einfluss auf die Impedanz. Die Phase der Impedanz ist von der Variation der Greifkraft weniger beeinflussbar als von der Variation der Andruckkraft.

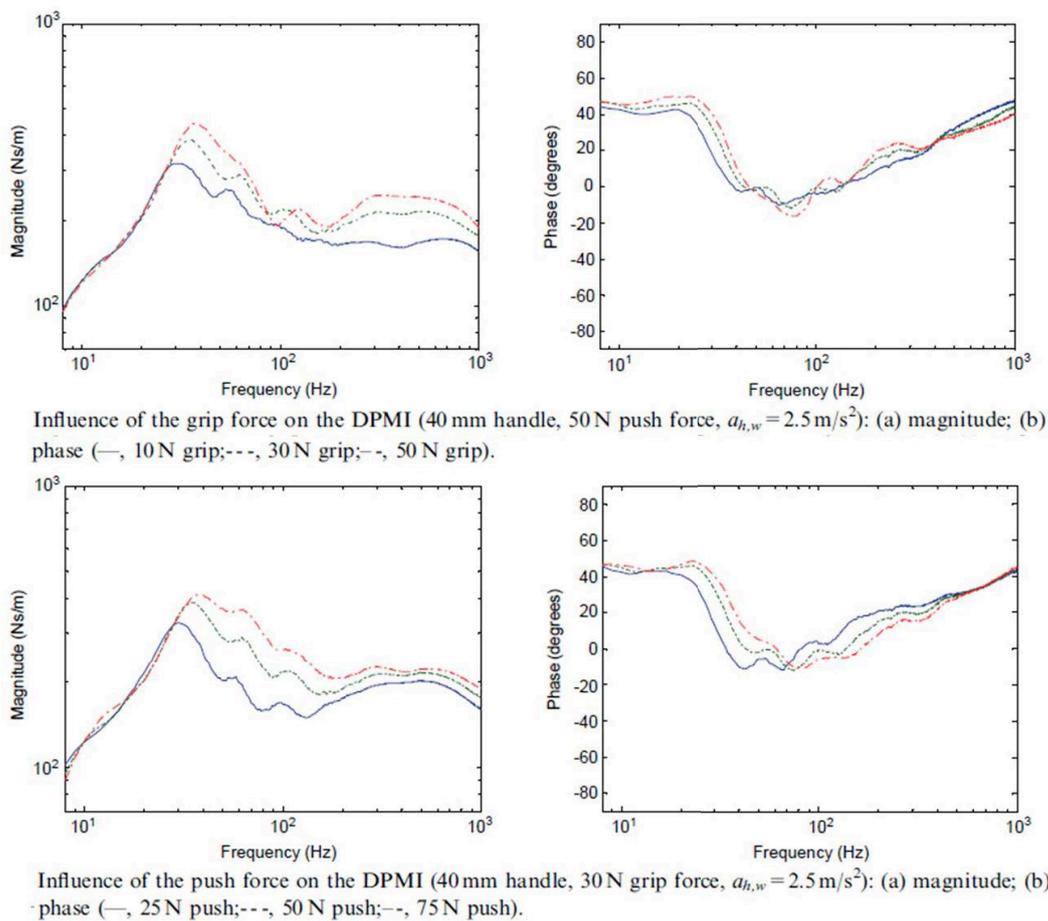


Bild 2-13: Der Einfluss der Greifkraft (oben) und der Andruckkraft (unten) auf die gemessene Impedanz des Anwenders in z_h -Richtung nach MARCOTTE ET AL.⁶²

⁶¹ vgl. Marcotte et al. 2005

⁶² Marcotte et al. 2005, S. 1086 (modifizierte Abbildung)

ALDIEN ET AL.⁶³ führten ebenfalls weitreichende Untersuchungen zum Einfluss der Greif- und Andruckkraft auf die Impedanz durch. Bei einer Untersuchung, in der ebenfalls die Armhaltung variiert wurde, gingen sie hierbei jedoch nur auf den Betrag der Impedanz ein. Die Ergebnisse sind in Bild 2-14 für die in Bild 2-15 abgebildeten Armhaltungen P1 und P2 dargestellt.

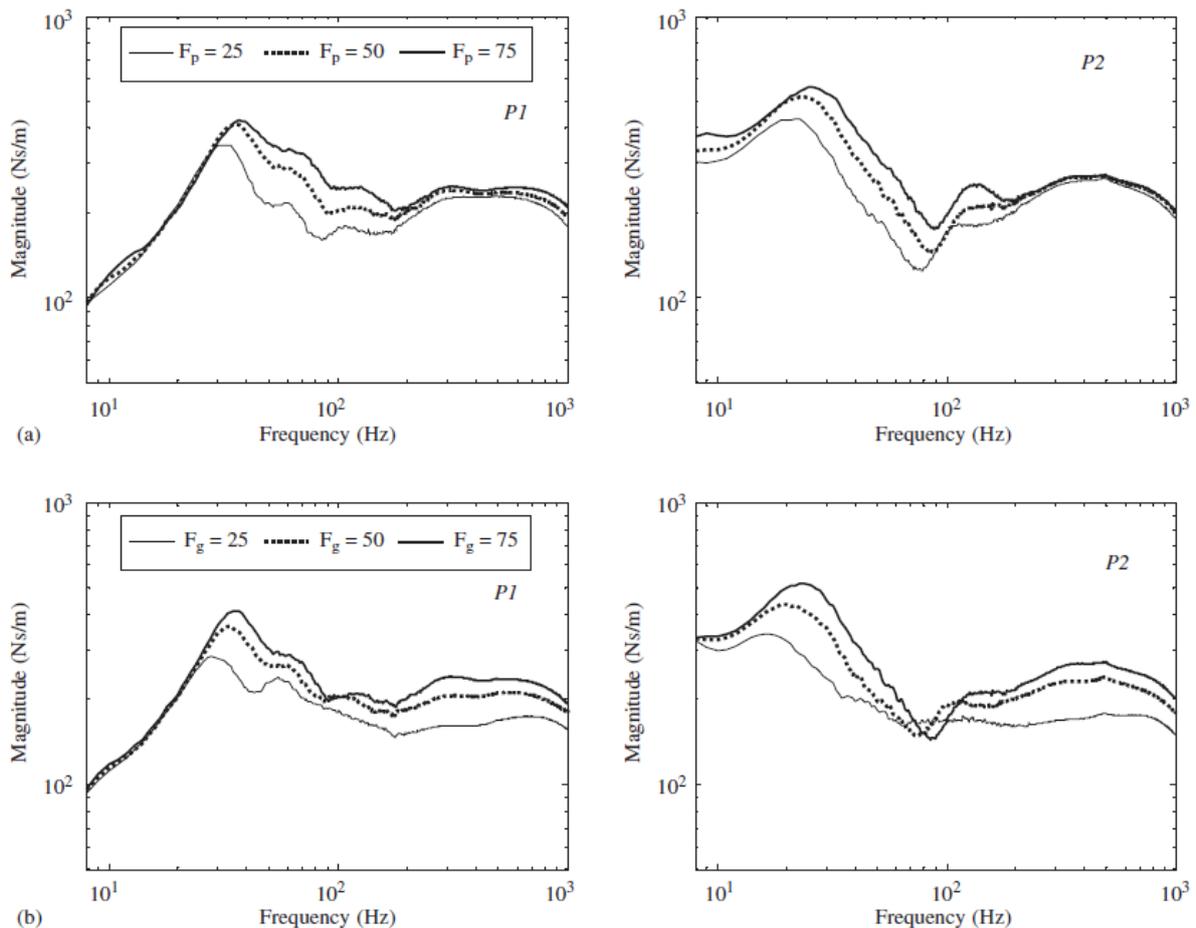


Bild 2-14: Der Einfluss der Andruckkraft (oben) und der Greifkraft (unten) auf die gemessene Impedanz des Anwenders in z_h -Richtung in den Armhaltungen P1 und P2 nach ALDIEN ET AL.⁶⁴

Deutlich erkennbar ist der unterschiedliche Einfluss von Greif- als auch Andruckkraft in den untersuchten Armhaltungen P1 und P2 der Probanden. Während beim abgewinkelten Arm (P1 - entspricht der in ISO 10068:2012-12 angegebenen Haltung) Greif- und Andruckkraft bis 30 Hz keinen Einfluss haben, ist dieser bei ausgestrecktem Arm (P2) deutlich zu erkennen. Nahezu im vollständigen Frequenzbereich führt die Erhöhung beider Kräfte unabhängig von der Haltung zu einer Erhöhung der Impedanz des Hand-Arm Systems.

⁶³ vgl. Aldien et al. 2006

⁶⁴ Aldien et al. 2006, S. 52

Von einer deutlichen Beeinflussbarkeit der Impedanz in Betrag und Phase durch die Andruckkraft berichtet auch BURSTRÖM⁶⁵ für die y_h - und z_h -Richtung. Die Beeinflussbarkeit der x_h -Richtung fällt dabei schwach aus.

2.3.5.3 Hand- und Armhaltung des Anwenders

Im Stand der Forschung existieren nur wenige Quellen, die eine Variation der Armhaltung untersuchen. Der von ALDIEN ET AL.⁶⁶ gemessene Einfluss der Armhaltung auf die passiven Anwendereigenschaften ist in Bild 2-15 dargestellt.

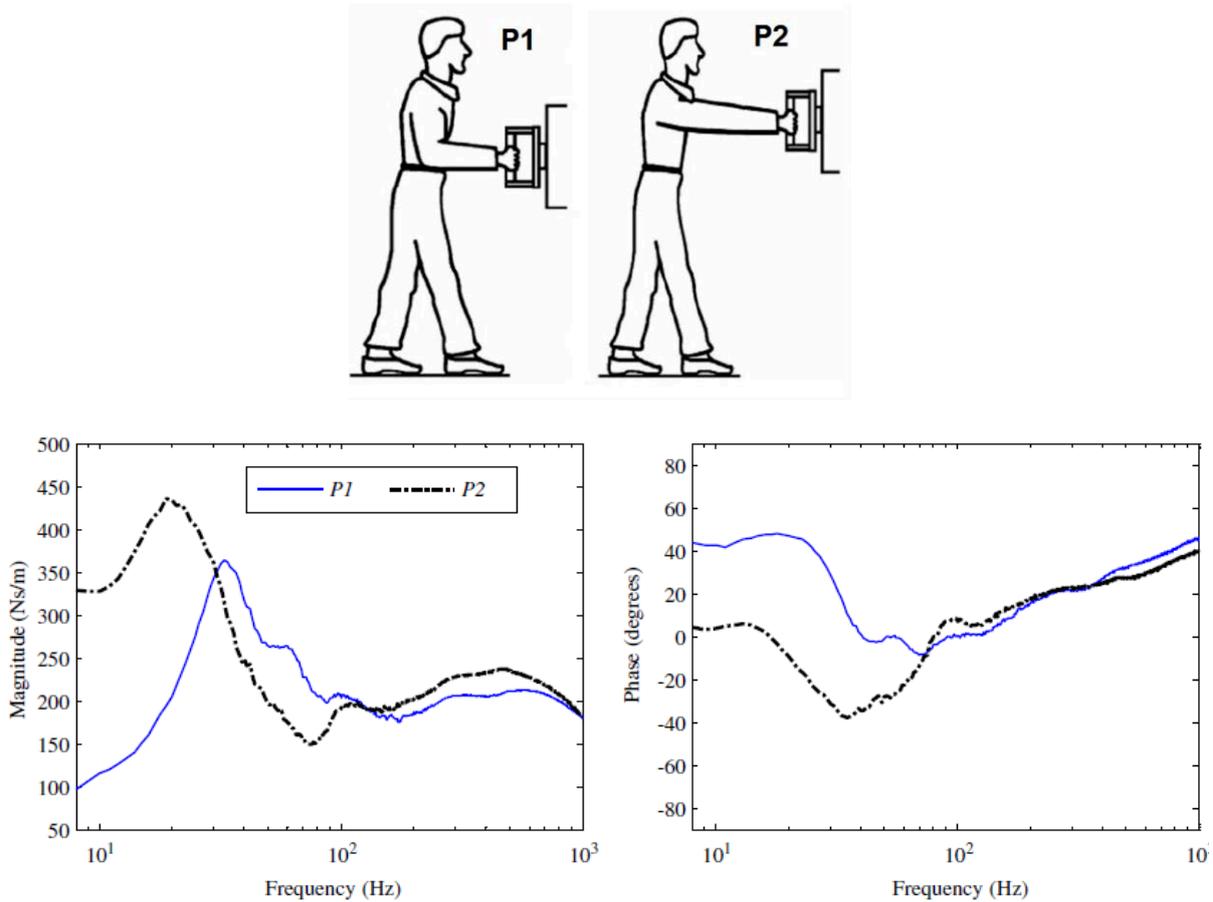


Bild 2-15: Einfluss der Armhaltung auf die Impedanz des Hand-Arm Systems in z_h -Richtung nach ALDIEN ET AL.^{67 68}

Deutlich ist zu erkennen, dass sich der Einfluss der Armhaltung sowohl in Betrag als auch Phase der Impedanz auf den Bereich unterhalb 100 Hz beschränkt. Unterhalb dieser Frequenz sind aber Variationen der Impedanz um etwa 300% möglich. Die

⁶⁵ vgl. Burström 1997

⁶⁶ vgl. Aldien et al. 2006

⁶⁷ Aldien et al. 2006, S. 48 (modifizierte Abbildung)

⁶⁸ Aldien et al. 2006, S. 50

Beschränkung der Frequenz nach oben wird von DONG ET AL.⁶⁹ dadurch erklärt, dass insbesondere unter 100 Hz eine Vibrationsleitung in den Arm hinein zu erwarten ist, während Frequenzen oberhalb auf die Übertragung in Finger, Hand und Handgelenk begrenzt sind. Die Armhaltung kann demnach oberhalb 100 Hz kaum Einfluss haben.

Untersuchungen zum Haltungseinfluss in z_h -Richtung wurden auch von BESA ET AL.⁷⁰ durchgeführt. Hier wurde zusätzlich noch eine leicht nach oben ausgestreckte Armhaltung untersucht (Hand etwa auf Augenhöhe). Auch in diesen Untersuchungen konnte ein großer Einfluss der Armhaltung auf den Betrag der Impedanz unterhalb 100 Hz festgestellt werden, der oberhalb 100 Hz stark nachließ. Über den Einfluss auf die Phase wurde nicht berichtet.

Die Beeinflussbarkeit des Betrages der Impedanz des Hand-Arm Systems bei verschiedenen Armhaltungen wurde auch von SHIBATA ET AL.⁷¹ untersucht. Sie gaben die gemessenen Impedanzen, wie in Bild 2-16 dargestellt, vergleichend zu den angegebenen Streubreiten der ISO 10068:2012-12 an.

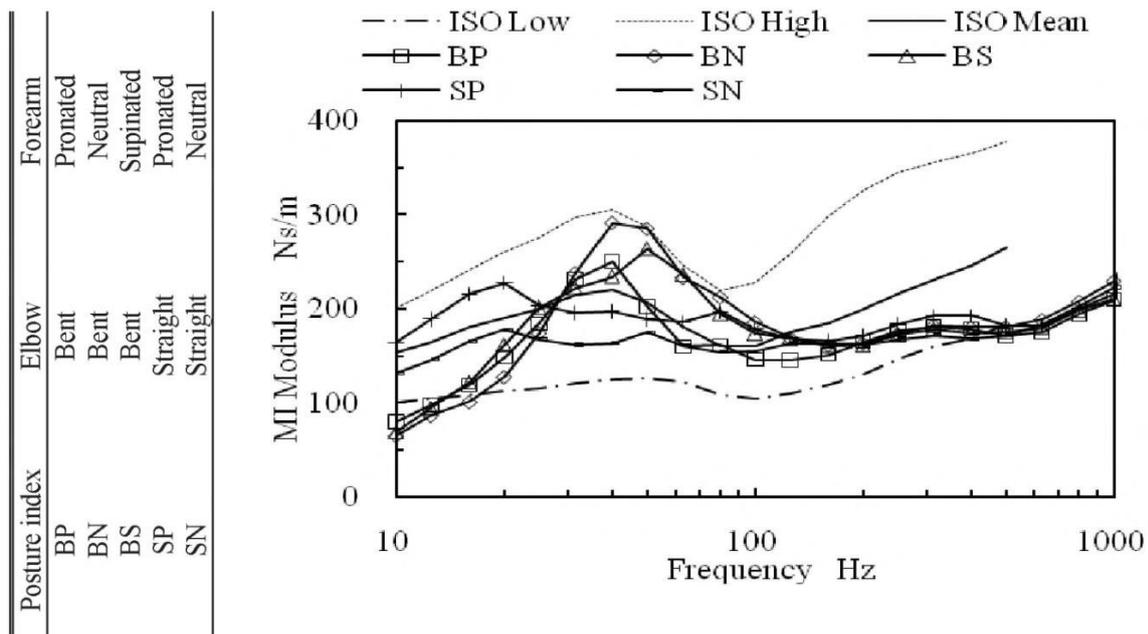


Bild 2-16: Einfluss der Armhaltung nach SHIBATA ET AL. auf die Impedanz des Hand-Arm Systems in z_h -Richtung⁷²

Wie zu erkennen, weichen die gemessenen Impedanzbeträge von den angegebenen Streubreiten der ISO 10068:2012-12 im Bereich unter 20 Hz nach unten ab. Im Übrigen hat die Haltung einen großen Einfluss auf die Impedanz des Hand-Arm

⁶⁹ vgl. Dong et al. 2001

⁷⁰ vgl. Besa et al. 2007

⁷¹ vgl. Shibata et al. 2011

⁷² Shibata et al. 2011, S. 98 und Shibata et al. 2011, S. 99

Systems in z_h -Richtung bis zu einer Frequenz von etwa 100 Hz. Allen Untersuchungen ist gemein, dass die Armhaltung durch Begrenzungen des Untersuchungssystems nicht beliebig variierbar ist. Bislang konnten hierdurch keine Versuche in freien Armhaltungen beispielsweise am weit über den Kopf ausgestreckten Arm durchgeführt werden. Unter Rotationsanregung sind keine Versuche bekannt.

2.3.5.4 Individuelle Unterschiede des Hand-Arm Systems

Der Einfluss vier verschiedener Probanden auf die Impedanz in Betrag und Phase wurde von GURRAM ET AL.⁷³ vorgestellt und ist in Bild 2-17 dargestellt.

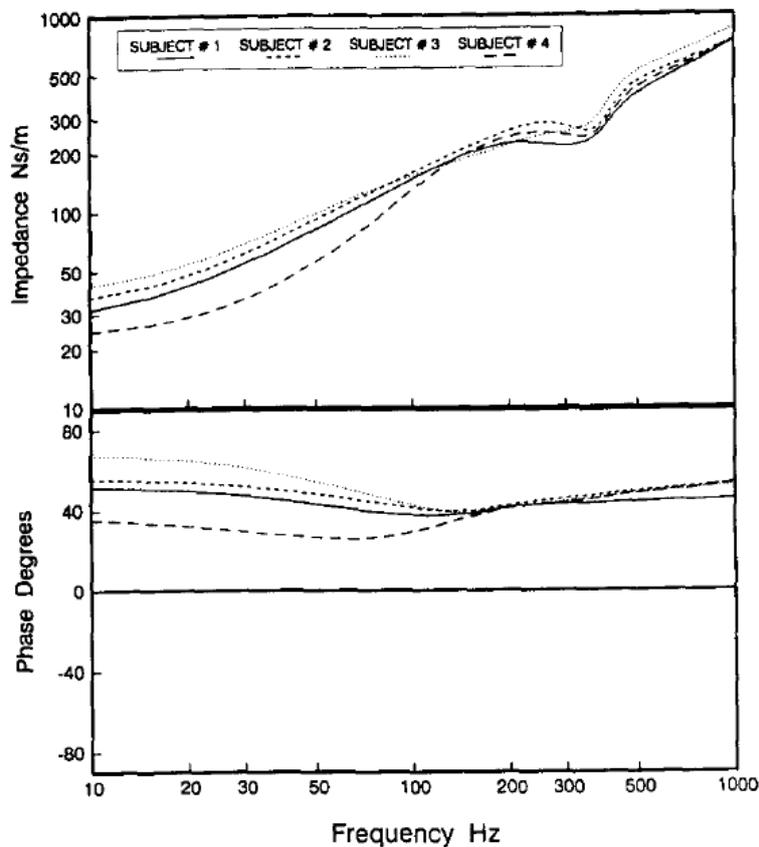


Bild 2-17: Der Einfluss des Probanden auf die gemessene Impedanz des Anwenders in x_h -Richtung nach GURRAM ET AL.⁷⁴

Der Proband hat, unter Beibehaltung der oben beschriebenen Einflussfaktoren, eine deutliche Auswirkung auf die Impedanz in Betrag und Phase. Insbesondere unterhalb 100 Hz sind deutliche Abweichungen unter den Probanden zu erkennen. Der Einfluss des Probanden auf die gemessene Impedanz verringert sich oberhalb 100 Hz schnell.

⁷³ vgl. Gurram et al. 1995b

⁷⁴ Gurram et al. 1995b, S. 139 (modifizierte Abbildung)

2.3.6 Modelle zur Beschreibung der passiven Anwendereigenschaften

Schon seit den 50er Jahren beschäftigen sich Forscher damit, das menschliche Hand-Arm System mit seinen dynamischen Eigenschaften durch ein beschreibbares mechanisches Ersatzmodell nachzubilden⁷⁵. Diese Modelle werden nach CRONJÄGER ET AL.⁷⁶ einerseits für theoretische Betrachtungen des Bewegungsverhaltens von Power-Tools genutzt und andererseits zur Abbildung der passiven Anwendereigenschaften in Versuchsständen. Aber auch in jüngerer Zeit ist die Nachbildung des Hand-Arm Systems ein aktuelles Thema. So fordert die VDI-Richtlinie 3831:2006-01 die Anwendung solcher Ersatzmodelle bei der Bestimmung der Schwingungsemission, der Dauerprüfungen und der Parameteroptimierung von Power-Tools, um die Schwingungsbelastung auf den Menschen in der entwicklungsbegleitenden Validierung von Power-Tools zu reduzieren. Prinzipiell lassen sich nach DONG ET AL. aus der Literatur zwei grundlegende Ansätze für Ersatzmodelle unterscheiden⁷⁷:

- 1) Biomechanisch motivierte Modelle, die zum Teil eine hohe Kompliziertheit besitzen und neben der Wirkung des Hand-Arm Systems an der Einleitungsstelle, Fragestellungen der Vibrationsleitung oder Belastungsverhältnisse im Hand-Arm System betrachten
- 2) Wirkungsäquivalente Modelle mit niedriger Kompliziertheit, welche nur die Wirkung des Hand-Arm Systems an der Einleitungsstelle vorhersagen

2.3.6.1 Biomechanisch motivierte Modelle

Im biomechanisch motivierten Modellansatz wird der Aufbau des menschlichen Hand-Arm Systems nachgeahmt. In vielen Ansätzen, wird der Arm hierzu in mehrere Starrkörper segmentiert und in einer Anordnung, die dem Menschen nachempfunden ist, gekoppelt. Beispielhaft seien hier die Modelle von FRITZ⁷⁸ und WOOD ET AL.⁷⁹ in Bild 2-18 und Bild 2-19 genannt.

⁷⁵ vgl. Cronjäger et al. 1984

⁷⁶ vgl. Cronjäger et al. 1984

⁷⁷ vgl. Dong et al. 2001

⁷⁸ vgl. Fritz 1991

⁷⁹ vgl. Wood et al. 1978

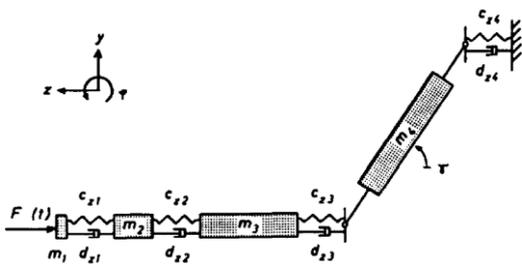


Bild 2-18: Biomechanisch motiviertes Hand-Arm Modell nach FRITZ⁸⁰

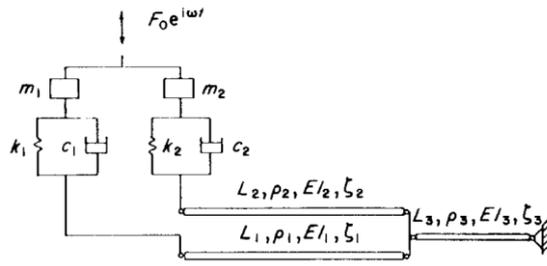


Bild 2-19: Biomechanisch motiviertes Hand-Arm Modell nach WOOD ET AL.⁸¹

Solche Modelle können dazu genutzt werden, die Kräfte und Momente in den Gelenken des Anwenders vorherzusagen. Ebenfalls ist eine Aussage über die Energiedissipation bei verschiedenen Anregungsfrequenzen möglich. So stellt FRITZ⁸² fest, dass Vibrationen oberhalb 100 Hz mehrheitlich im ersten Dämpfer des Modelles dissipieren und kaum in den Arm weitergeleitet werden.

Neben der reinen Abbildung der Struktur des Hand-Arm Systems ist es durch detaillierter aufgebaute Hand-Arm Modelle wie das in Bild 2-20 dargestellte möglich, verschiedene Armhaltungen des Anwenders zu betrachten.

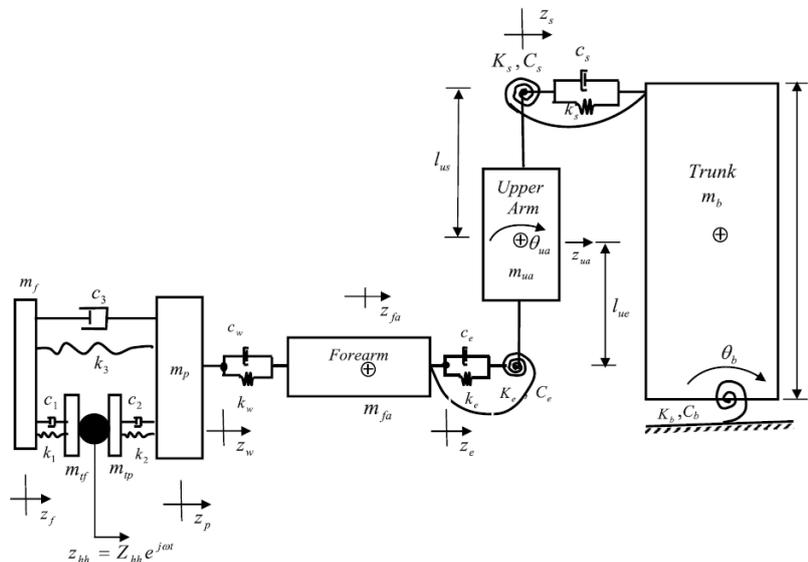


Bild 2-20: Biomechanisch motiviertes Hand-Arm Modell nach ADEWUSI ET AL.⁸³ mit der Möglichkeit zur Abbildung der Armhaltung des Anwenders

⁸⁰ Fritz 1991, S. 1166

⁸¹ Wood et al. 1978, S. 158

⁸² vgl. Fritz 1991

⁸³ Adewusi et al. 2012, S. 253

Zur Modellvalidierung kommen hierbei Verfahren zum Einsatz, die die Bewegung und Vibrationsleitung im Hand-Arm System messen können. Eine Möglichkeit besteht in der Messung der lokalen Beschleunigung der Hand-Arm Segmente mit auf der Haut aufgebrachten Vibrationssensoren, wie beispielsweise von ADEWUSI ET AL.⁸⁴ vorgestellt und in Bild 2-21 dargestellt. Da die Vibrationssensoren jedoch das Hand-Arm System durch Ihre Masse verstimmen und nur an begrenzten Stellen eine zeitgleiche Messung möglich ist, wurden auch kontaktlose Messungen mittels Laservibrationsmessung durchgeführt, wie beispielsweise von WELCOME ET AL.⁸⁵ vorgestellt und in Bild 2-22 gezeigt.

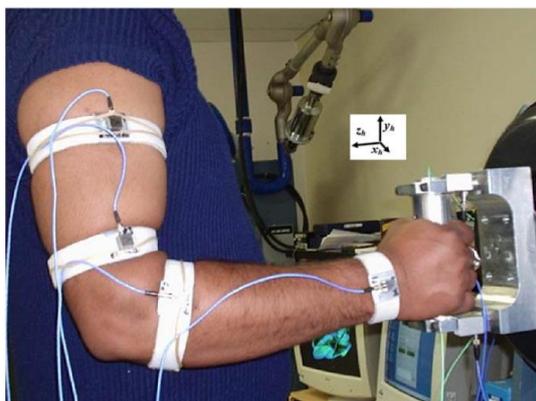


Bild 2-21: Messung der Vibrationsleitung im Hand-Arm System mit Sensoren⁸⁶

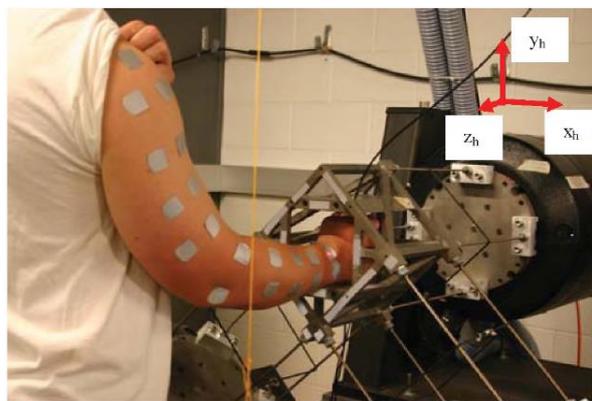


Bild 2-22: Messung der Vibrationsleitung im Hand-Arm System mittels Laser⁸⁷

Weiter entwickelte Modelle bilden neben der reinen Struktur des Hand-Arm Systems auch die Weichteile des Hand-Arm Systems als so genannte Schwabbelmasse ab. Beispielhaft sei hier das Hand-Arm Modell von KEPPLER⁸⁸ genannt, welches auch in der kommerziellen Software von Biomotion Solutions umgesetzt wurde. Auch für spezielle Simulationsaufgaben wie die Simulation von Impulsen im Hand-Arm System ist dieser Ansatz vielversprechend. Ein Modell zur Simulation der Kräfte zwischen Tennisschläger und Hand mit dem Ansatz der Schwabbelmasse wurde von KING ET AL.⁸⁹ vorgestellt. Um zu einer biologisch sinnvollen Massenaufteilung zu gelangen und zwischen verschiedenen Knochen und Weichteilstrukturen zu unterscheiden, kann

⁸⁴ vgl. Adewusi et al. 2010

⁸⁵ vgl. Welcome et al. 2011

⁸⁶ Adewusi et al. 2010, S. 2957

⁸⁷ Welcome et al. 2011, S. 44

⁸⁸ vgl. Keppler 2003

⁸⁹ vgl. King et al. 2011

beispielsweise, wie in ARTHURS UND ANDREWS⁹⁰ vorgestellt, das Verfahren der Dual-Röntgen-Absorptiometrie genutzt werden.

Einige Modelle im Stand der Forschung haben das Ziel, neben der Untersuchung der Vibrationsleitung und Abbildung der Impedanzen, die Vibrationsabsorption im Gewebe zu untersuchen. Diese Studien bedienen sich komplizierter FE-Modelle der Weichteile und der Knochenstruktur. Als Beispiele seien zwei Modelle genannt: Das in Bild 2-23 dargestellte Modell von WU ET AL.⁹¹, das eine greifkraftabhängige Untersuchung der Vibrationsleitung ermöglicht und das in Bild 2-24 gezeigte Modell von ADEWUSI ET AL.⁹², das eine Untersuchung der Eigenfrequenzen ermöglicht.

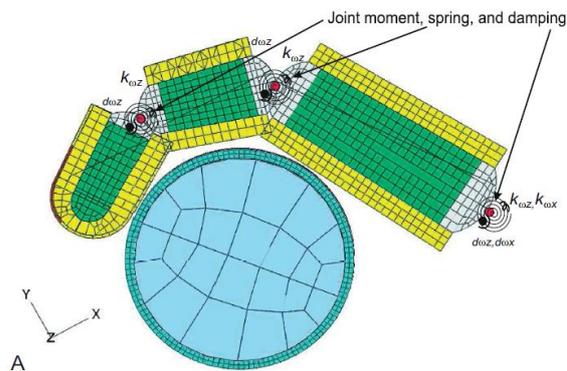


Bild 2-23: FE-Modell des Fingers an einem zylindrischen Griff⁹³

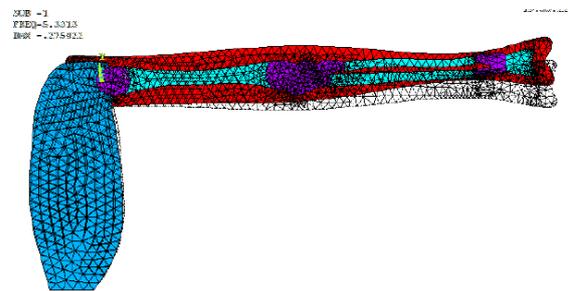


Bild 2-24: FE-Modell zur Untersuchung der Eigenfrequenzen und Moden des Hand-Arm Systems⁹⁴

Weit entwickelte kommerzielle biomechanisch motivierte Modelle des Menschen, welche die Simulation dynamischer Effekte unterstützten, sind alaska/Dynamicus, AnyBody/CADFEM.

2.3.6.2 Wirkungsäquivalente Modelle

Beim Ansatz der wirkungsäquivalenten Modelle wird die Wirkung des Hand-Arm Systems an der Einleitungsstelle simuliert. Das Hand-Arm System wird durch ein meist linear aufgebautes Mehrmassen-Schwinger Modell (Feder-Masse-Dämpfer System) mit unterschiedlicher Anzahl von Freiheitsgraden nachgebildet. Jede schwingende Masse der in Bild 2-25 beispielhaft dargestellten Modelle entspricht hierbei einem Freiheitsgrad.

⁹⁰ vgl. Arthurs und Andrews 2009

⁹¹ vgl. Wu et al. 2017

⁹² vgl. Adewusi et al. 2014

⁹³ Wu et al. 2017, S. 63

⁹⁴ Adewusi et al. 2014, S. 549

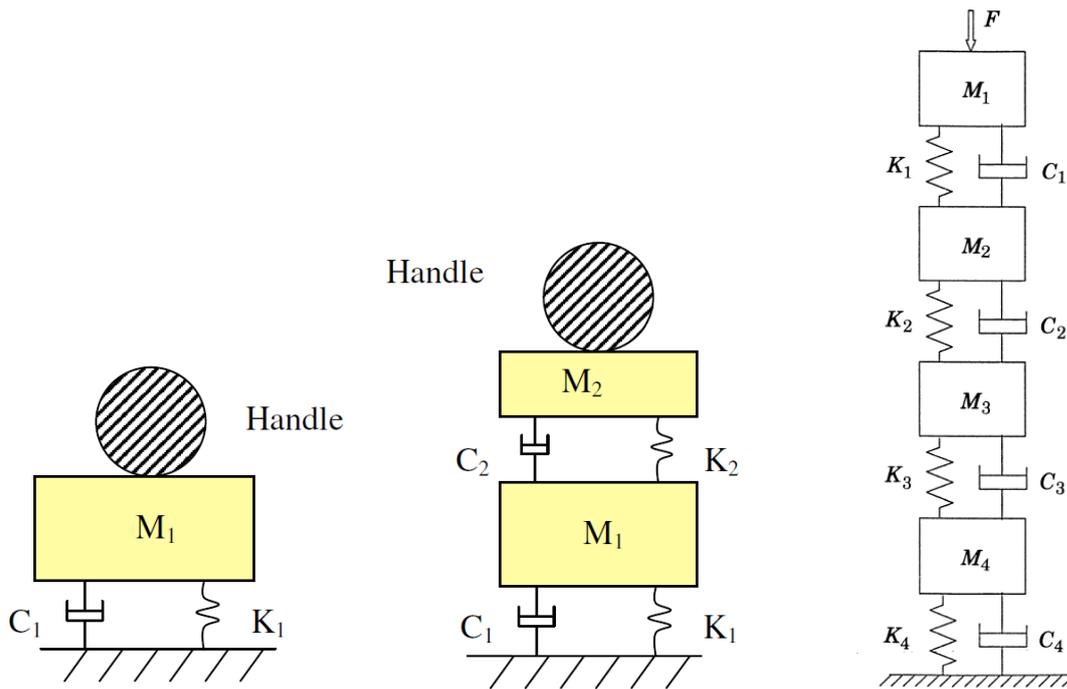


Bild 2-25: Zur Krafteinleitungsstelle wirkungsäquivalente Mehrmassen-Schwinger Hand-Arm Modelle mit einem und zwei Freiheitsgraden⁹⁵ und mit vier Freiheitsgraden⁹⁶

Die Modelle sind immer nur für eine bestimmte Anwendung unter definierten Frequenzspektren gültig. Eine von der untersuchten Armhaltung abweichende Haltung sowie eine Änderung der Greif- und Andruckkräfte führen zu unterschiedlichen Reaktionen des Hand-Arm Systems⁹⁷. Ein wirkungsäquivalentes lineares Modell kann somit ohne eine Anpassung von Parametern nur für eine einzige Armhaltung gültig sein. Einen Überblick der bestehenden Konfigurationen solcher wirkungsäquivalenter Modelle bieten beispielsweise RAKHEJA ET AL.⁹⁸. DONG ET AL.⁹⁹ stellten fest, dass solche Modelle zwar nicht exakt die real gemessenen passiven Eigenschaften des Hand-Arm Systems wiedergeben können, jedoch die einzige Möglichkeit darstellen, eine Prüfumgebung für Geräte überhaupt zu realisieren. Sie propagieren hier den Einsatz von Modellen, die eine möglichst geringe Kompliziertheit aufweisen. Ein solches Zwei-Massen Modell wurde beispielsweise von MARCOTTE ET AL.¹⁰⁰ vorgestellt. GURRAM ET AL.¹⁰¹ passten ein entwickeltes Mehrmassen-Schwinger Hand-Arm Modell mit vier

⁹⁵ Dong et al. 2010, S. 435

⁹⁶ Gurram et al. 1995a, S. 441

⁹⁷ vgl. Keppler 2003

⁹⁸ vgl. Rakheja et al. 2002

⁹⁹ vgl. Dong et al. 2008

¹⁰⁰ vgl. Marcotte et al. 2010

¹⁰¹ vgl. Gurram et al. 1996

Freiheitsgraden für verschiedene Greifstärken an und zeigten, dass durch eine reine Variation der Modellparameter die Variationen der Impedanz für verschiedene Greifkräfte abbildbar sind.

Ein Modell, das rechts neben dem in Bild 2-26 dargestellten wirkungsäquivalenten Modell mit zwei Freiheitsgraden der ISO 10068:2012-12 gezeigt wird, ist das von DONG ET AL.¹⁰² vorgestellte Modell zur Abbildung der Impedanz, aufgeteilt in Finger und Handballen (vgl. Bild 2-27). Es ist ein Hybrid aus den zuvor vorgestellten biomechanisch motivierten Modellen und den wirkungsäquivalenten Modellen. Es kombiniert die biomechanisch motivierten Ansätze mit dem geringen Detaillierungsgrad von wirkungsäquivalenten Modellen. DONG ET AL.¹⁰³ entwickelten dieses Modell weiter, so dass die Parameter dieses Modells, genau wie für das Zwei-Massen-Modell, für alle Raumrichtungen bestimmt wurden.

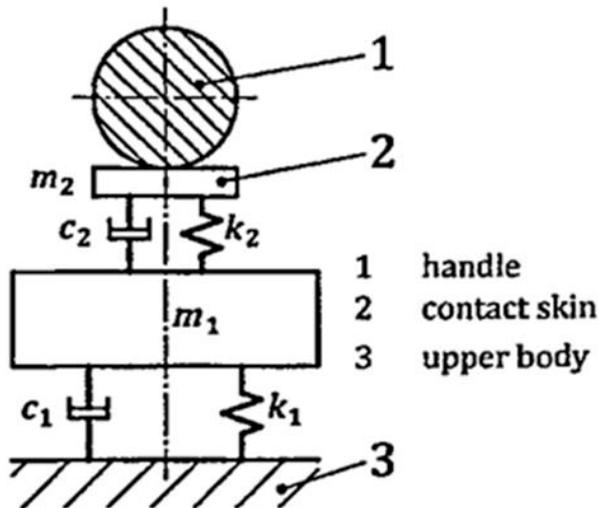


Bild 2-26: Wirkungsäquivalentes Hand-Arm Modell mit zwei Freiheitsgraden¹⁰⁴

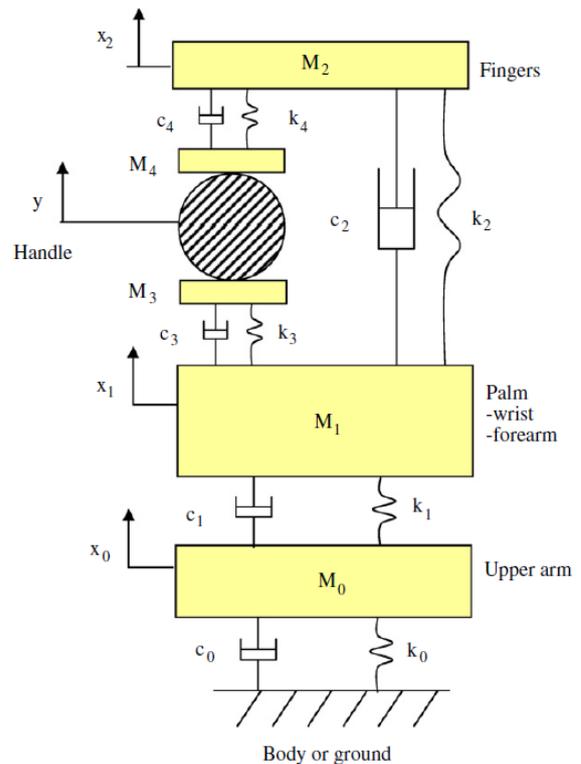


Bild 2-27: Biologisch motiviertes wirkungsäquivalentes Hand-Arm Modell mit fünf Freiheitsgraden¹⁰⁵, welches in der ISO 10068:2012-12 herangezogen wird

¹⁰² vgl. Dong et al. 2007

¹⁰³ vgl. Dong et al. 2013

¹⁰⁴ ISO 10068:2012-12, S. 15

¹⁰⁵ Dong et al. 2007, S. 2336

Viele Power-Tools weisen neben der translatorischen Anregung auch einen erheblichen Anteil an rotatorischen Vibrationen auf. Beispiel hierfür sind Exzentrerschleifer, Montageschrauber, Trockenbauschrauber und die Gruppe der Schlag- und Impulsschrauber. Um den Anwender in Validierungsszenarien für solche Power-Tools in Modellen abzubilden, müssen die passiven Anwendereigenschaften in Rotationsrichtung bekannt sein. An im Stand der Forschung bekannten Anregungssystemen zur Untersuchung des Hand-Arm Systems bei Vibrationsbeaufschlagung sind bislang keine Untersuchungen bzgl. der Unterarm-Achse bei rotatorischen Vibrationsanregungen mit hohen Frequenzen durchgeführt worden. LIN ET AL.¹⁰⁶ berichten von der Anregung des Hand-Arm Systems in rotatorischer Richtung (vgl. Bild 2-28). Hier wurde das Hand-Arm System durch eine auswechselbare harmonisch schwingende Schwungscheibe angeregt. Das Ziel der Untersuchung war hierbei die Modellierung des Reaktionsverhaltens des Menschen bei einem Torsionsmoment, wie es bei Schraubern auftritt. Daten für stark vibrierende Geräte standen dabei nicht im Fokus. Die Untersuchung ist, bedingt durch das Messprinzip, nur bei diskreten Anregungsfrequenzen, Amplituden und somit Beschleunigungen möglich und nicht für überlagerte Vibrationen geeignet, wie sie üblicherweise bei vibrierenden Geräten auftreten. Die Untersuchungsfrequenz der Anregung war durch die Eigenfrequenz der Schwungscheiben auf maximal 5 Hz begrenzt. Die meisten vibrierenden Geräte regen in deutlich höheren Frequenzen an.

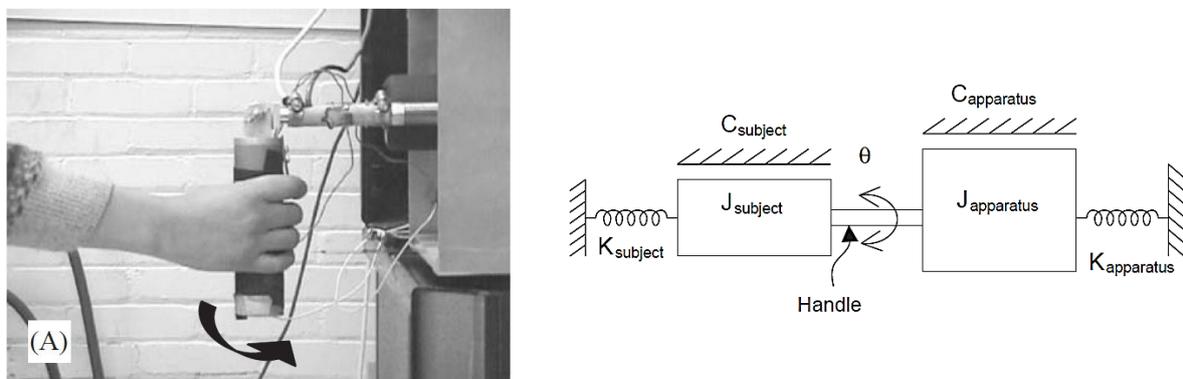


Bild 2-28: Anregungssystem zur Vermessung der dynamischen Eigenschaften des Hand-Arm Systems in rotatorischer Richtung¹⁰⁷ und abgeleitetes Modell für Anregungssystem und Hand-Arm System¹⁰⁸

Über ein äquivalent aufgebautes Hand-Arm Modell mit einem Freiheitsgrad wurde von JOSHI ET AL.¹⁰⁹ berichtet. Das Hand-Arm System wurde innerhalb dieser Untersuchungen durch einen Schrauber mit Momenten-Sprüngen beaufschlagt,

¹⁰⁶ vgl. Lin et al. 2003

¹⁰⁷ Lin et al. 2003, S. 1847

¹⁰⁸ Lin et al. 2003, S. 1846

¹⁰⁹ vgl. Joshi et al. 2008

während Moment und Auslenkungswinkel bei diesem Einzelereignis erfasst wurden. Auch in dieser Untersuchung an Schraubern mit Pistolengriffen standen Reaktionen und Wechselwirkungen des Hand-Arm Systems beim An- und Abschalten des Schraubers im Fokus. Die Untersuchungsergebnisse lassen keinen Rückschluss auf die Wechselwirkung bei vibrierenden Anregungen zu.

Untersuchungen zum passiven Anwenderverhalten an Winkel-Schraubern wurden von AY ET AL.¹¹⁰ durchgeführt. Hier standen ebenfalls die Reaktionen des Hand-Arm Systems auf ein Einzelereignis im Fokus. Von AY ET AL. wurde hierfür das in Bild 2-29 dargestellte Messsystem entwickelt, mit dem sowohl Moment als auch Auslenkungswinkel bestimmt werden können.

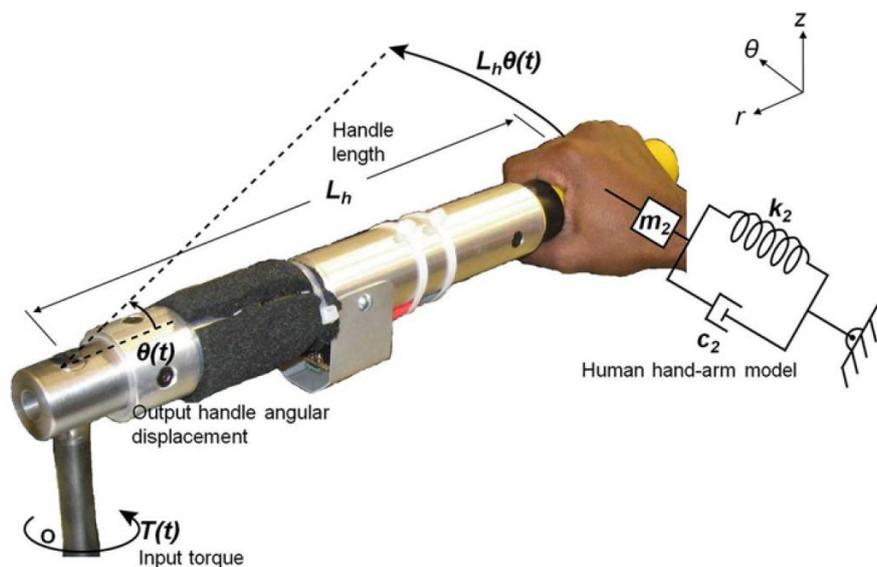


Bild 2-29: Messsystem zur Messung der dynamischen Eigenschaften des Hand-Arm Systems am Winkel-Schrauber und eingezeichnetes Hand-Arm Modell¹¹¹

Bild 2-29 zeigt zudem den verwendeten Modellierungsansatz von AY ET AL.. Die Reaktion des Hand-Arm Systems auf das Einzelereignis wird demnach in einem linear aufgebauten Hand-Arm Modell modelliert, welches in einem radialen Abstand um den Drehpunkt angreift.

2.3.6.3 Wirkungsäquivalentes Modell der ISO 10068:2012-12

Im Zusammenhang dieser Arbeit wird das in Bild 2-30 dargestellte Zweimassen-Schwinger Modell aus der ISO 10068:2012-12 als Referenzmodell herangezogen werden, welches für die in Bild 2-31 dargestellten translatorischen Anregungen mit verschiedenen Parametersätzen abgeleitet wurde. In ISO 10068:2012-12 werden die in Tabelle 2-1 beschriebenen Parameter für das Modell vorgeschlagen.

¹¹⁰ vgl. Ay et al. 2013

¹¹¹ Ay et al. 2013, S. 896

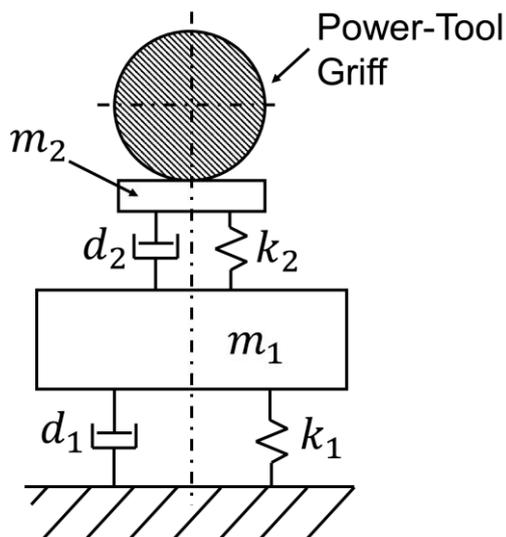


Bild 2-30: Zweimassen-Schwinger Modell zur Abbildung der Impedanz des Hand-Arm Systems nach ISO 10068:2012-12

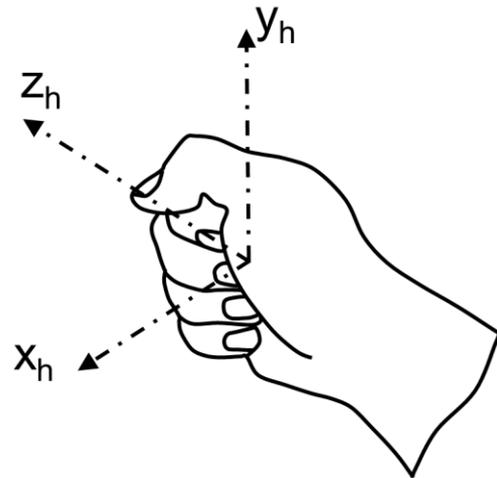


Bild 2-31: Bewegungsrichtungsangaben am Hand-Arm System nach EN ISO 5349-1:2001-12

Tabelle 2-1: Parameter des Zweimassen-Schwinger Modells zur Abbildung der Impedanz des Hand-Arm Systems nach ISO 10068:2012-12

	x_h -Richtung	y_h -Richtung	z_h -Richtung
m_1 in kg	0,5479	0,5374	1,2458
m_2 in kg	0,0391	0,0100	0,0742
k_1 in N/m	400	400	1000
k_2 in N/m	0	17648	50000
d_1 in Ns/m	22,5	38,3	108,1
d_2 in Ns/m	202,6	75,5	142,4

Bild 2-32 zeigt den Verlauf der Impedanz des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase nach ISO 10068:2012-12 über der Frequenz (vgl. Abschnitt 2.3.4), aufgetragen für die drei Raumrichtungen im grifforientierten Koordinatensystem (vgl. Bild 2-31).

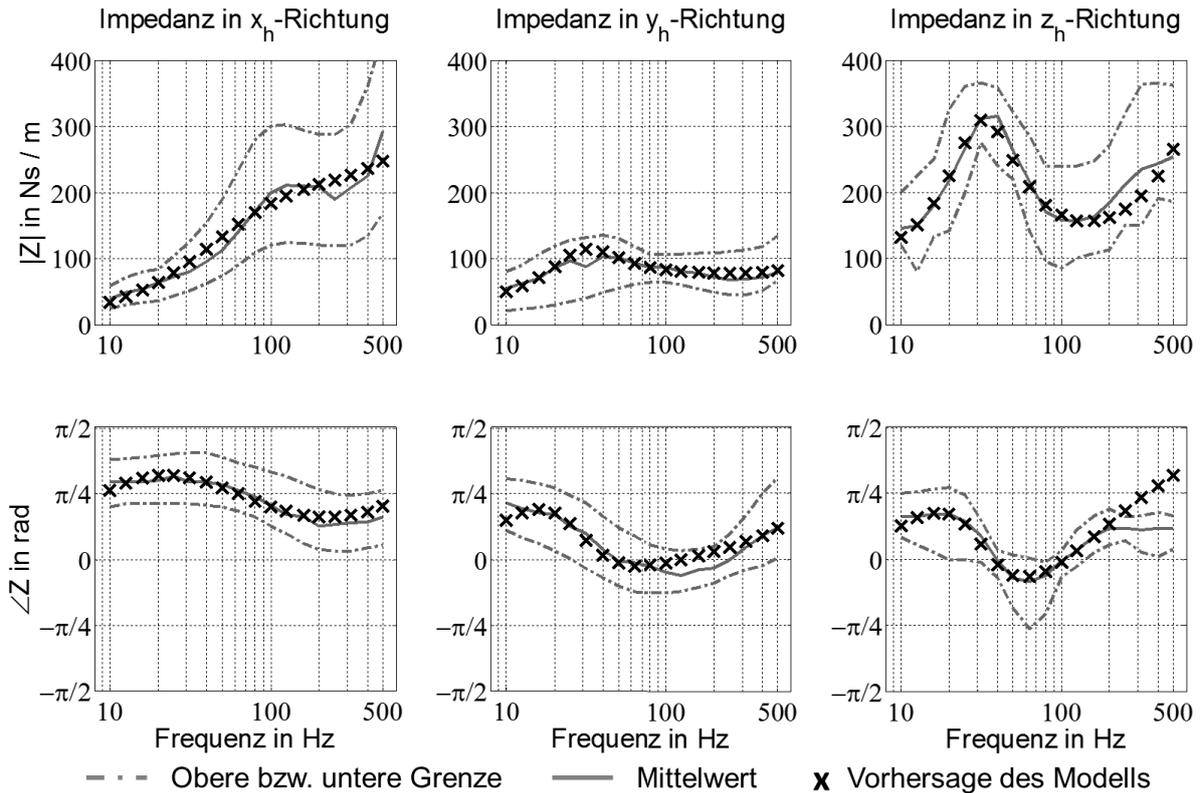


Bild 2-32: Impedanz des Hand-Arm Systems und des Modells nach ISO 10068:2012-12 für die drei translatorischen Raumrichtungen im grifforientierten Koordinatensystem

Die angegebenen oberen und unteren Grenzen der Impedanz des Hand-Arm Systems sind als Strich-Punkt Linie aufgetragen, der Durchschnittswert jeweils als durchgezogene Linie. Die vom Modell der ISO 10068:2012-12 vorhergesagten Impedanzen in Betrag und Phase sind jeweils mit Kreuzmarkierungen dargestellt. Bild 2-32 ist zu entnehmen, dass die mittleren gemessenen Impedanzen des Hand-Arm Systems in allen drei Raumrichtungen über weite Frequenzbereiche in guter Näherung vom Zweimassen-Hand-Arm Modell vorhergesagt werden können.

2.3.7 Mechanische Schaltungsstruktur zur Berechnung von Modellimpedanzen

Um eine Berechnung der Impedanz in Betrag und Phase in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz für wirkungsäquivalente Modelle (vgl. Abschnitt 2.3.6.2) zu ermöglichen, kann die mechanische Schaltungsstruktur nach SEIDEL¹¹² genutzt werden. Ein Zweimassen-Schwinger Modell lässt sich in diesem Ansatz, wie in Bild 2-33 dargestellt, als Reihen- und Parallelschaltung der einzelnen Bauteilimpedanzen auffassen.

¹¹² vgl. Seidel 2001

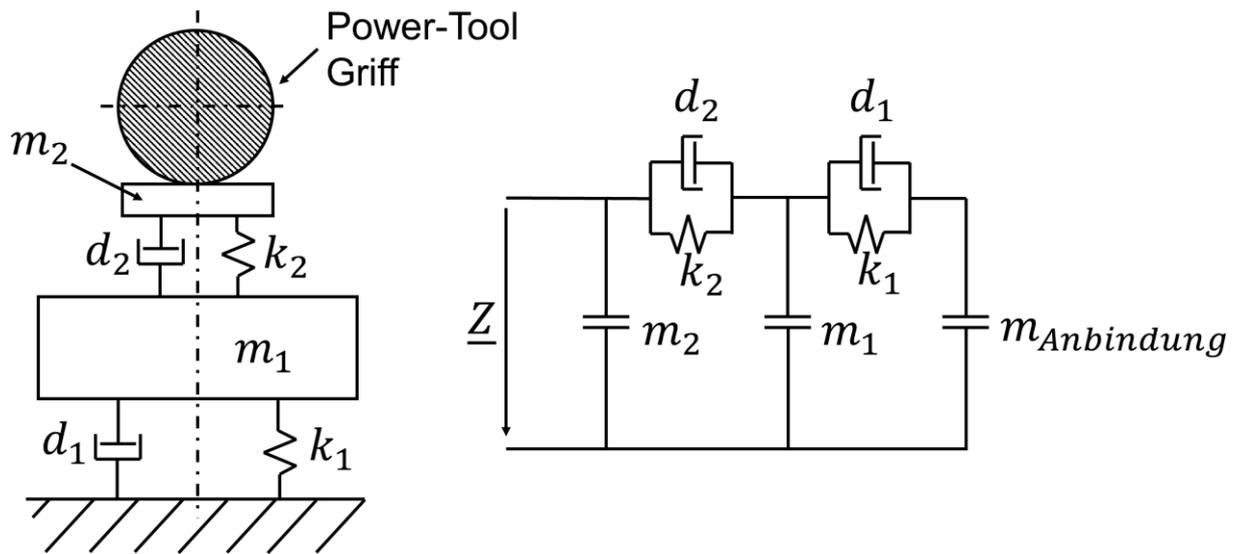


Bild 2-33: Ersatzschaltbild (rechts) für das Hand-Arm Modell der ISO 10068:2012-12 (links) nach dem Ansatz von SEIDEL¹¹³

Es gelten hierbei mit der Kreisfrequenz ω die folgenden mathematischen Beziehungen zur Errechnung der Impedanz der einzelnen Glieder bzw. der Gesamtimpedanz des Aufbaus. Für die Impedanz $\underline{Z}_m(\omega)$ der Masse m gilt:

$$\underline{Z}_m(\omega) = m \cdot j \cdot \omega \quad \text{Gl. 2-6}$$

Für die Impedanz $\underline{Z}_k(\omega)$ gilt mit der Steifigkeit k :

$$\underline{Z}_k(\omega) = \frac{1}{k \cdot j \cdot \omega} \quad \text{Gl. 2-7}$$

Für die Impedanz $\underline{Z}_d(\omega)$ der Dämpfung d gilt:

$$\underline{Z}_d(\omega) = d \quad \text{Gl. 2-8}$$

Nach SEIDEL¹¹⁴ gilt für eine Parallelschaltung von Impedanzen:

$$\underline{Z}_{ges}(\omega) = \underline{Z}_1(\omega) + \underline{Z}_2(\omega) \quad \text{Gl. 2-9}$$

Und für die Reihenschaltung:

$$\underline{Z}_{ges}(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_1(\omega)} + \frac{1}{\underline{Z}_2(\omega)}} \quad \text{Gl. 2-10}$$

¹¹³ vgl. Seidel 2001

¹¹⁴ vgl. Seidel 2001

Somit gilt für den dargestellten Aufbau (jeweils als Funktion von ω):

$$\underline{Z}_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{d_1} + \underline{Z}_{k_1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{m_{Anbindung}}}} + \frac{1}{\underline{Z}_{d_2} + \underline{Z}_{k_2}}} + \underline{Z}_{m_2} \quad \text{Gl. 2-11}$$

Oder vereinfacht und mit $\underline{Z}_{m_{Anbindung}} \rightarrow \infty$ bei einer starren Anbindung des Modells an die Umwelt (jeweils als Funktion von ω):

$$\underline{Z}_{ges} = \frac{(\underline{Z}_{d_2} + \underline{Z}_{k_2})(\underline{Z}_{m_1} + \underline{Z}_{d_1} + \underline{Z}_{k_1})}{\underline{Z}_{m_1} + \underline{Z}_{d_1} + \underline{Z}_{k_1} + \underline{Z}_{d_2} + \underline{Z}_{k_2}} + \underline{Z}_{m_2} \quad \text{Gl. 2-12}$$

Mit Gl. 2-12 ergibt sich Betrag $|\underline{Z}_{ist}(\omega)|$ und Phase $\angle \underline{Z}_{ist}(\omega)$ nach Gl. 2-4 und Gl. 2-5 für jede gesuchte Kreisfrequenz ω für den dargestellten Zweimassen-Schwinger. Dieses Vorgehen kann auf beliebige mechanische Mehrmassen-Schwinger Schaltungsstrukturen übertragen werden.

2.4 Abbildung der passiven Anwendereigenschaften in Prüfständen für Power-Tools

Die Vibrations-Emission ist von der Interaktion zwischen Anwender und Gerät abhängig, was eine Standardisierung von Schwingungsmessungen erschwert. Prüfstände, die den Anwender in seinen passiven Eigenschaften nachbilden, haben im Stand der Forschung oft das Ziel, diese Messungen zu standardisieren. Nur wenige Prüfstände fokussieren die Parameteroptimierung und Lebensdauerprüfung von Power-Tools.

2.4.1 Prüfstände für Kettensägen

ABRAMS UND SUGGS¹¹⁵ stellten den in Bild 2-34 schematisch dargestellten Prüfstand für die Messung der Vibrationsemissionen von Kettensägen vor.

¹¹⁵ vgl. Abrams und Suggs 1977

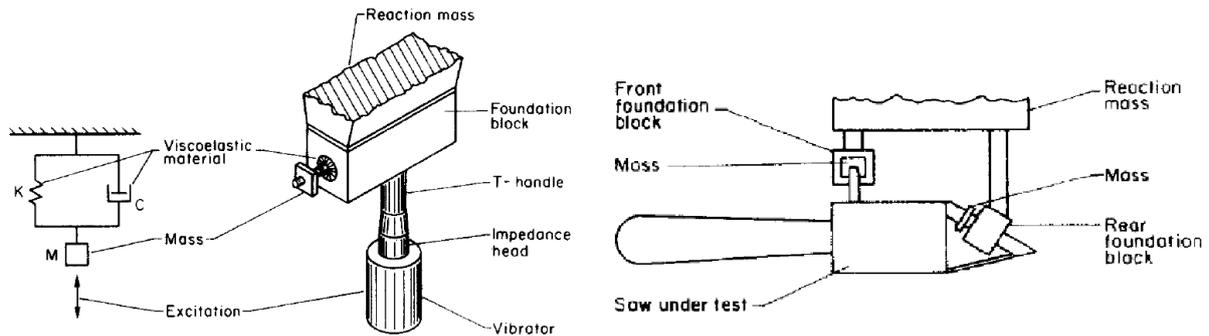


Bild 2-34: Schematische Zeichnung des Prüfstandes für Kettensägen und verwendetes Hand-Arm Modell¹¹⁶

Sie erstellten auf Basis von Impedanz-Messungen am Arm ein Hand-Arm Modell mit einem Freiheitsgrad. Das Dämpfer- und Feder-Element des theoretischen Modells wurde im Prüfstand durch ein visko-elastisches Material in Abmaßen der menschlichen Hand realisiert, welches direkt mit den Gerätegriffen verbunden ist. Die Werkstückseite wurde im Prüfstand nicht abgebildet, so dass die Belastungen auf das Gerät und dessen Bauteile nicht vergleichbar zur realen Anwendung sind. Ein ähnlich aufgebauter Prüfstand, der jedoch auch die Messung im Eingriff der Kettensäge erlaubt, wurde von REYNOLDS UND WILSON¹¹⁷ vorgestellt. BYSTRÖM ET AL.¹¹⁸ stellten ein ölgedämpftes Hand-Arm Modell vor, welches in einem Prüfstand für Kettensägen umgesetzt wurde. In Vibrations-Vergleichsmessungen zwischen Anwender und Prüfstandsaufbau stellten sie fest, dass die Vibrationen am Griff der Kettensäge - innerhalb der Varianz verschiedener Benutzer am Prüfstand sowohl im Eingriff als auch im freilaufenden Betrieb - wiedergegeben werden konnten.

2.4.2 Prüfstände für Bohrhämmer

HANSSON UND KIHLBERG¹¹⁹ nutzten das vorgestellte Modell von BYSTRÖM ET AL.¹²⁰ für den Aufbau eines Prüfstandes für Schlagbohrmaschinen. Sie erweiterten das Hand-Arm Modell um drei Druckluftkammern, um die Andruckkräfte in jeder Raumrichtung einzeln regeln zu können. Die Forscher untersuchten das Vibrations- und Geräuschverhalten der Bohrmaschine im Vergleich zwischen Prüfstand und realem Anwender. Der Vergleich zwischen den auftretenden Vibrationsamplituden zeigte nur geringe Abweichungen.

¹¹⁶ Abrams und Suggs 1977, S. 132

¹¹⁷ vgl. Reynolds und Wilson 1983

¹¹⁸ vgl. Byström et al. 1982

¹¹⁹ vgl. Hansson und Kihlberg 1983

¹²⁰ vgl. Byström et al. 1982

Der in Bild 2-35 dargestellte Prüfstand für die Lebensdaueruntersuchung von Bohrhämmern unter realitätsnaher Abbildung des Anwenders wurde von CRONJÄGER ET AL.¹²¹ vorgestellt.

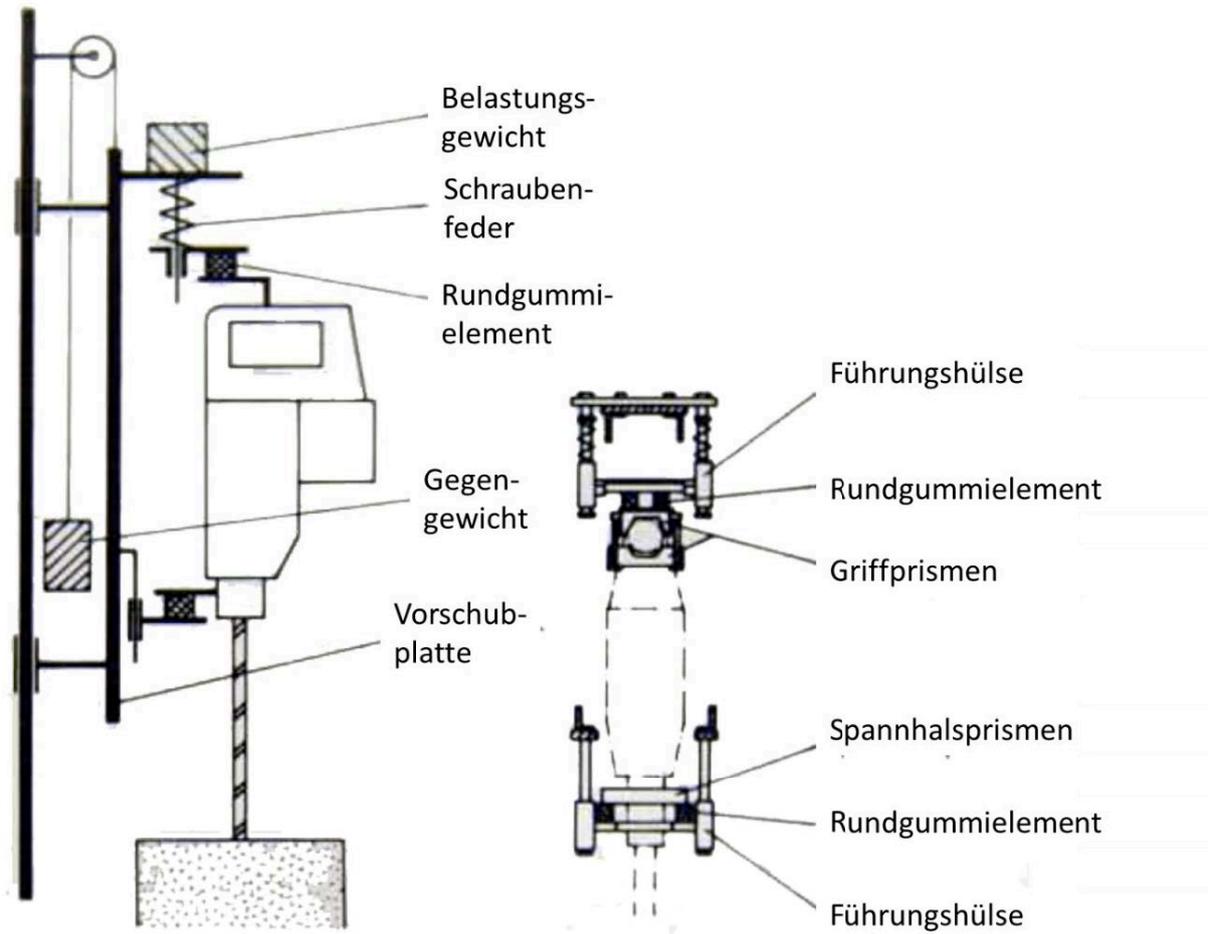


Bild 2-35: Schematische Zeichnung des Prüfstandes für Bohrhammer und verwendetes Hand-Arm Modell¹²²

Ziel der Entwicklung war, das Versuchspersonal durch einen wirkungsäquivalenten Ersatzaufbau zu ersetzen, um dieses vor Vibrationen bei Lebensdaueruntersuchungen an Bohrhämmern zu schützen. Die dynamischen Eigenschaften des Hand-Arm Systems wurden von den Forschern durch ein einfaches translatorisches Ein-Massen-Modell mit einer Kombination aus Rundgummielementen und Schraubenfedern als Gerätekopplung zum Prüfstand nachgebildet. Als Beurteilungsgröße für die Wirkungsäquivalenz zwischen realem Versuch mit Anwender und Prüfstandversuch wurden die Schwingungsamplitude des Gerätes, die Bohrgeschwindigkeit sowie die Leistungsaufnahme gemessen und miteinander

¹²¹ vgl. Cronjäger et al. 1984

¹²² Cronjäger et al. 1984, S. 45 (modifizierte Abbildung)

verglichen. Ähnliche Prüfstände, mit gleichem Entwicklungsfokus, wurden, wie in Bild 2-36 abgebildet, von KINNE UND MELZIG-THIEL¹²³ und SCHENK UND KNOLL¹²⁴ vorgestellt.

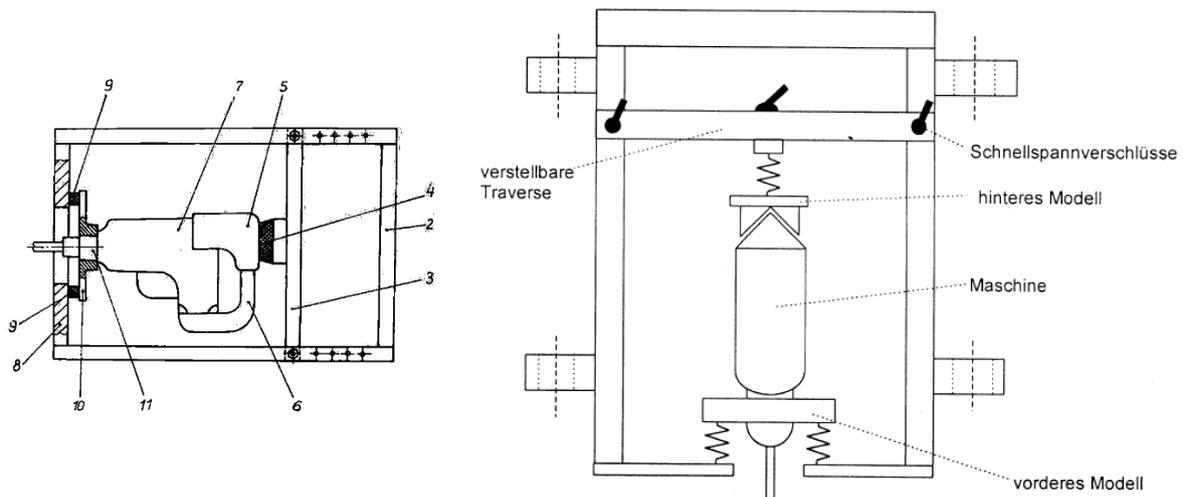


Bild 2-36: Schematische Zeichnungen der Prüfstände für Bohrhämmer von KINNE UND MELZIG-THIEL¹²⁵ (links) und SCHENK UND KNOLL¹²⁶ (rechts)

Auf Basis der Untersuchungen von CRONJÄGER ET AL.¹²⁷ entwickelte die MAC PANTHER GMBH¹²⁸ den in Bild 2-37 abgebildeten Prüfstand, in dem ein Gerät durch einen Industrieroboter mit vorgeschaltetem Hand-Arm Modell geführt ist. Mit Hilfe dieses Prüfstandes können alle Bohrrichtungen (über Kopf, horizontal und vertikal nach unten) getestet werden. Ziel der Versuche in dieser Versuchsumgebung war die automatisierte Testung der Bohreinsätze. Eine Weiterentwicklung dieses Prüfstandes zur Überprüfung der Funktionen des Gesamtsystems wurde am IPEK – Institut für Produktentwicklung 2017 in Betrieb genommen. Der Prüfstand bildet die Basis zukünftiger Forschungsarbeiten, wie diese beispielsweise in Abschnitt 8.2 beschrieben sind. In diesem Prüfstand kommt ebenfalls das auf den Arbeiten von CRONJÄGER ET AL. basierende Hand-Arm Modell zum Einsatz. Im Gegensatz zum ursprünglich von der MAC PANTHER GMBH vorgestelltem Prüfstand ist eine freie Verstellbarkeit des Versuchsuntergrundes im Raum möglich.

¹²³ vgl. Kinne und Melzig-Thiel 1993

¹²⁴ vgl. Schenk und Knoll 1998

¹²⁵ Kinne und Melzig-Thiel 1993, S. 579

¹²⁶ Schenk und Knoll 1998, S. 39

¹²⁷ vgl. Cronjäger et al. 1984

¹²⁸ vgl. Mac Panther GmbH 2018



Bild 2-37: Prüfstand zur Bestimmung der Bohrleistung von Bohrern¹²⁹

MARCOTTE ET AL.¹³⁰ stellten erstmalig einen Prüfstand mit einem Hand-Arm Modell mit zwei Freiheitsgraden vor (vgl. Bild 2-38). Unterhalb einer Anregung von 50 Hz konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Impedanz des menschlichen Hand-Arm Systems und Hand-Arm Modells erzielt werden. Die gewichteten Beschleunigungswerte des Griffes weichen zwischen realem Anwender und Prüfstand-Messung nur wenig ab. Ein weiterer Prüfstand mit einem Hand-Arm Modell mit zwei Freiheitsgraden stellt REMPEL ET AL.¹³¹ vor. Ziel des Prüfstandes ist der Ersatz des Anwenders in standardisierten Vibrationsmessungen. REMPEL ET AL. stellen fest, dass durch den Einsatz des Prüfstandes zum Anwendertest vergleichbare Beschleunigungswerte des Griffes erzielbar sind.

¹²⁹ Mac Panther GmbH 2018

¹³⁰ vgl. Marcotte et al. 2010

¹³¹ vgl. Rempel et al. 2017

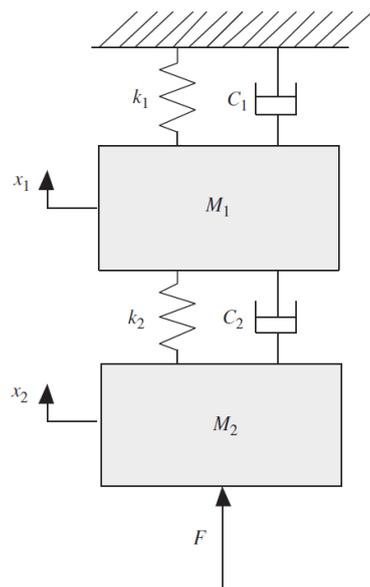


Bild 2-38: Prüfstand für einen Abbruchhammer¹³² unter Verwendung eines Hand-Arm Modells mit zwei Freiheitsgraden¹³³

Das in Bild 2-39 abgebildete Hand-Arm Modell, das die passiven Anwendereigenschaften durch einen Aktor nachbildet, wurde von GUZZELLA ET AL.¹³⁴ vorgestellt.

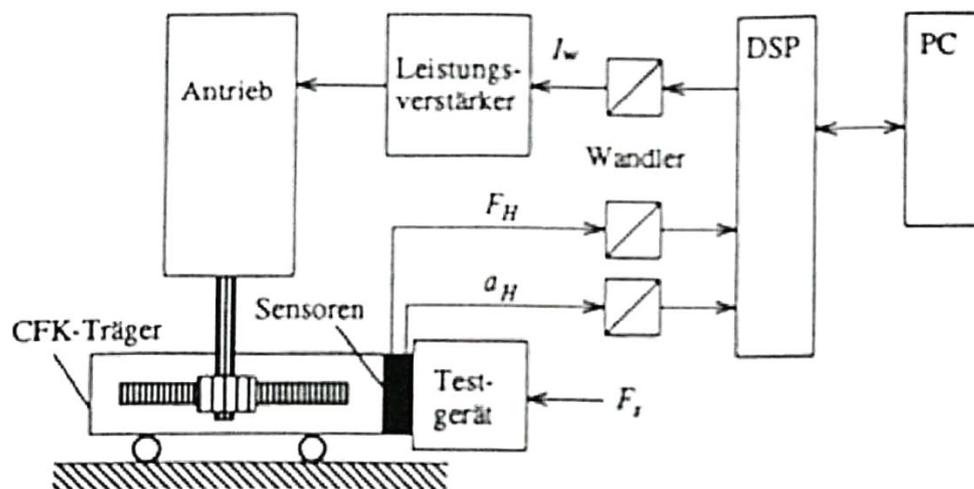


Bild 2-39: Hand-Arm Modell mit Nachbildung der passiven Anwendereigenschaften durch einen Aktor¹³⁵

¹³² Marcotte et al. 2010, S. 1973

¹³³ Marcotte et al. 2010, S. 1971

¹³⁴ vgl. Guzzella et al. 1993

¹³⁵ Guzzella et al. 1993, S. 622

Besondere Herausforderung eines solchen Konzeptes ist nach GUZZELLA ET AL.¹³⁶ die Auslegung der Regelungsparameter. Insbesondere für Frequenzen über 100 Hz konnte bislang keine mechanische Lösung vorgestellt werden. Ein genereller Nachteil dieser geregelten Systeme (auch als Impedanz Regelung bezeichnet) ist, dass diese Systeme bei hohen Frequenzanteilen Zwangskräfte auf das System ausüben¹³⁷. In allen Power-Tools treten zur Hauptfrequenz des Power-Tools solche Frequenzanteile auf. Insbesondere wenn Stöße im Power-Tool auftreten, kommen hohe Frequenzanteile hinzu, die solche Impedanz Regelungssysteme unter bisherigen technischen Randbedingungen im Stand der Forschung nicht ermöglichen.

2.4.3 Prüfstände für Schrauber

AY ET AL.¹³⁸ stellten den in Bild 2-40 dargestellten Prüfstand für Winkel-Schrauber vor.



Bild 2-40: Prüfstand für Winkel-Schrauber mit Abbildung der passiven Anwendeigenschaften¹³⁹

¹³⁶ vgl. Guzzella et al. 1993

¹³⁷ vgl. Bruchmüller et al. 2015

¹³⁸ vgl. Ay et al. 2010

¹³⁹ Ay et al. 2010, S. 1165

Der Prüfstand bildet die passiven Anwendereigenschaften hierbei durch Luftdruckzylinder ab, deren Steifigkeit sich durch eine Druckveränderung verändern lassen. Wie bereits im Abschnitt 2.3.6.2 für das Hand-Arm Modell beschrieben, ist das eingesetzte Hand-Arm Modell auf ein Einzelereignis ausgelegt. Das Hand-Arm Modell ist demnach nicht für die Abbildung von Impedanzen ausgelegt.

2.5 Messgriffe an Power-Tools

Neben den in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Methoden zur Messung der Impedanz, existieren Ansätze, die Interaktion zwischen Power-Tool und Anwender durch den Einsatz von Messgriffen zu erfassen. HAHN¹⁴⁰ stellte einen Messgriff für einen Bohrhämmer vor, mit dem es möglich ist, die Vorhersagedaten für den Kraftverlauf an der Schnittstelle zwischen Hand und Power-Tool einer Hand-Arm System Simulation in Hauptanregungsrichtung mit denen einer Messung zu vergleichen. Der in Bild 2-41 dargestellte Griff wird hierfür vom eigentlichen Gerät getrennt und durch ein Sensorelement wieder an das Gerät angefügt.

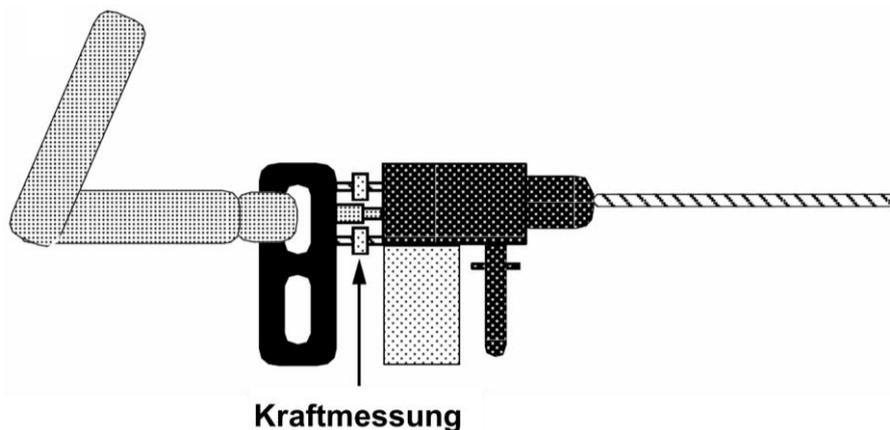


Bild 2-41: Schematische Darstellung des Messgriffs zur Aufnahme der Interaktionskräfte in Hauptanregungsrichtung zwischen Anwender und Bohrhämmer¹⁴¹

Von einer Ableitung der passiven Anwendereigenschaften oder von Studien zu deren Auswirkungen wurde im Zuge der Tests mit dem Messgriff nicht berichtet.

¹⁴⁰ vgl. Hahn 1993 (Diplomarbeit)

¹⁴¹ Hahn 1993 (Diplomarbeit), S. 15 (modifizierte Abbildung)

LIN ET AL.¹⁴² berichten über den in Bild 2-42 dargestellten Messgriff für Schrauber.

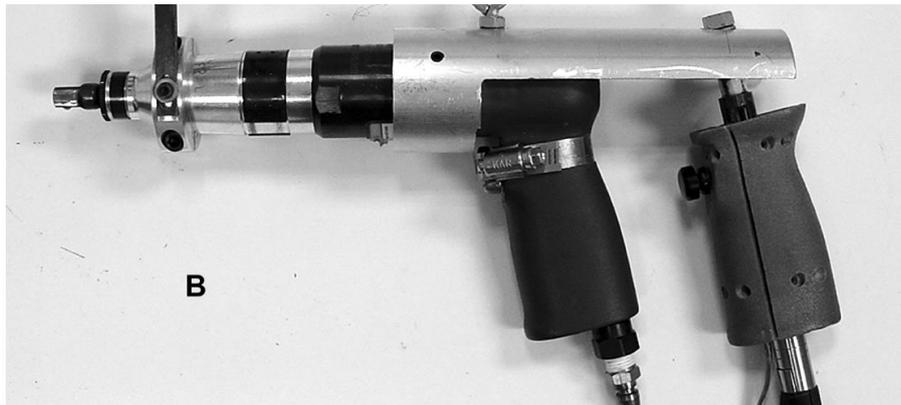


Bild 2-42: Messgriff zur Aufnahme der Greifkraft des Anwenders und des Momentes zwischen Anwender und Schrauber¹⁴³

Der Messgriff ist hierbei als zusätzlicher Griff hinter dem eigentlichen Griff des Schraubers angeordnet. Er ermöglicht sowohl das wirkende Moment zwischen Anwender und Schrauber als auch die Greifkraft des Anwenders zu messen. Ziel der Untersuchungen mit diesem Messgriff ist die Bewertung von Sicherheitsrisiken und ergonomischen Fragestellungen. Die Charakterisierung der passiven Anwendereigenschaften oder deren Auswirkungen ist durch die relativ weiche Anbindungsstruktur zwischen beiden Griffen nicht möglich.

2.6 XiL-Validierungsansatz für Power-Tools

Wie bereits in Abschnitt 1.1 beschrieben, hat die Arbeit das Ziel, die kontinuierlichen physischen und virtuellen Validierungsaktivitäten in der Entwicklung von Power-Tools zu unterstützen, die zu frühem Erkenntnisgewinn führen und späte teure Iterationen vermeiden. Die Validierung von Power-Tools kann hierbei nur im Super-System, welches aus den Subsystemen Anwender, Power-Tool und Werkstück besteht, stattfinden. Dieser Umstand gilt hierbei nicht nur für das Subsystem Power-Tool, sondern auch für eine zu entwickelnde Komponente innerhalb des Subsystems Power-Tool. Dieses Verständnis der Validierung beschreibt der IPEK-X-in-the-Loop-(IPEK-XiL)-Ansatz für Power-Tools wie er von MATTHIESEN ET AL.¹⁴⁴ vorgestellt und in Bild 2-43 visualisiert ist.

¹⁴² vgl. Lin et al. 2007

¹⁴³ Lin et al. 2007, S. 334

¹⁴⁴ vgl. Matthiesen et al. 2018d



Bild 2-43: Der IPEK-X-in-the-Loop-(IPEK-XiL)-Ansatz für Power-Tools¹⁴⁵

Die zu entwickelnde Komponente, das System in Development, ist in Anlehnung an den generalisierten IPEK-X-in-the-Loop-(IPEK-XiL)-Ansatz nach ALBERS ET AL.¹⁴⁶ und ALBERS UND DÜSER¹⁴⁷ stets in sein Gesamtsystem, die Umwelt und auch in eventuell weitere interagierende Systeme wie beispielsweise den Anwender einzubinden. Die mit dem System in Development agierenden Systeme werden dabei als Connected Systems bezeichnet. Teil dieser Connected Systems ist bei Power-Tools der Anwender, das Rest-Power-Tool und die Umwelt, welche in der Anwendung und in abgeleiteten Testfällen miteinander agieren. Die Umwelt beinhaltet in diesem Ansatz das Werkstück im Sinne von Bild 2-1. Das Rest-Power-Tool beinhaltet alle Elemente, die nötig sind, um das System in Development einzubinden. Bei einer Entwicklung des Schlagwerkes ist dies also beispielsweise der Rest des Power-Tools, welcher unverändert bleibt. Der entscheidende Erfolgsfaktor bei der Validierung ist es, das Connected System innerhalb dieses Gesamtsystems nur in dem Maße zu vereinfachen, dass die für die Validierung relevanten Wechselwirkungen zum System in Development nicht verkürzt werden und trotzdem eine Reproduzierbarkeit erreicht wird. Einen Rahmen für Validierungsaktivitäten, welcher bei der Umsetzung dieser

¹⁴⁵ Matthiesen et al. 2018d, S. 1

¹⁴⁶ vgl. Albers et al. 2016

¹⁴⁷ vgl. Albers und Düser 2008

Forderung hilft, bietet das in Bild 2-44 dargestellte IPEK-X-in-the-Loop-(IPEK-XiL)-Framework, das von MATTHIESEN ET AL.¹⁴⁸ auf Power-Tools angewandt wurde.

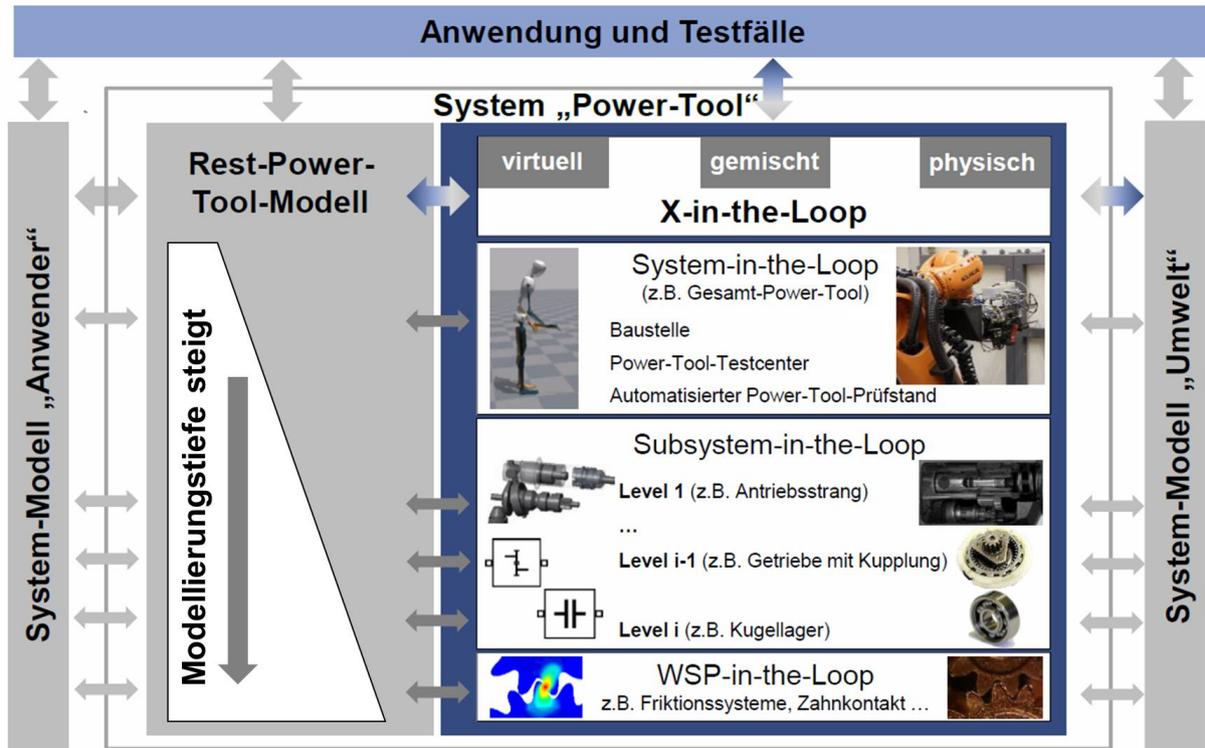


Bild 2-44: Das IPEK-X-in-the-Loop-(IPEK-XiL)-Framework für Power-Tools¹⁴⁹

Kerngedanke des Frameworks ist, dass die Untersuchung des X-in-the-Loop auf verschiedenen Systemebenen sowohl rein virtuell, physisch oder auch gemischt stattfinden kann. Je nach Systemebene ist eine unterschiedliche Modellierungstiefe des virtuellen oder physischen Rest-Power-Tool-Modells nötig, um das X-in-the-Loop in das Gesamtsystem einzubinden. Ist beispielsweise bei der Untersuchung eines gesamten Power-Tools auf der System-in-the-Loop-Ebene kaum ein Restgeräte-Modell notwendig, so ist bei der Untersuchung auf der Wirkflächenpaar-Ebene (WSP-in-the-Loop) der gesamte Antriebsstrang und die Rückwirkungen des Gehäuses auf das X-in-the-Loop als Rest-Power-Tool-Modell zu berücksichtigen, sofern ein Einfluss auf das Validierungsergebnis zu erwarten ist. Das Rest-Power-Tool-Modell kann dabei, genau wie das Modell des Anwenders und der Umwelt, ebenfalls virtuell, physisch oder auch gemischt vorliegen. Anwender und Umwelteinfluss sind innerhalb dieses Frameworks als wechselwirkende Systeme mit dem X-in-the-loop als Modelle zu berücksichtigen. Allen Modellen ist hierbei gemein, dass nur solche Aspekte der Wechselwirkungen in den Modellen zu berücksichtigen sind, welche auch Einfluss auf das Validierungsergebnis nehmen.

¹⁴⁸ vgl. Matthiesen et al. 2018d

¹⁴⁹ Matthiesen et al. 2018d, S. 2 (modifizierte Abbildung)

Die vorliegende Arbeit ordnet sich im Sinne dieses IPEK-X-in-the-Loop-(IPEK-XiL)-Frameworks bei der Entwicklung von Anwendermodellen ein. Einerseits wird abgeleitet, welche Aspekte der passiven Anwendereigenschaften im Anwendermodell zu berücksichtigen sind und andererseits werden konkrete Vorschläge für ein solches Anwendermodell abgeleitet.

2.7 Fazit zum Stand der Forschung

Bei der Entwicklung von handgehaltenen Geräten ist die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Anwender, Gerät und Werkstück in vielen Validierungsschritten essentiell. Die heterogenen Anwendereigenschaften, führen zu Streuungen im Versuch und somit zu Unsicherheiten im Entwicklungsprozess. Ein Teil dieser Anwendereigenschaften sind die passiven Anwendereigenschaften, die nur indirekt vom Anwender beeinflusst werden können und sich durch die Impedanz beschreiben lassen. Die Impedanz des Anwenders unterliegt vielen Einflussfaktoren. Bei gegebener Griffkontur, Vibrationsform und Richtung, also bei einem gegebenen Power-Tool, sind die veränderlichen Einflussfaktoren der passiven Anwendereigenschaften die Greif- und Andruckkraft, die Armhaltung und die individuellen Unterschiede des Anwenders selbst. Die Auswirkungen von Greif- und Andruckkräften auf die Impedanz des Hand-Arm Systems sind in der Literatur ausgiebig beschrieben worden. Der Einfluss der Armhaltung auf die Impedanz in typischen Arbeitshaltungen des Menschen ist bislang nur in wenigen Quellen erwähnt. Alle Untersuchungsmethoden sind durch das schwierig zu variierende Untersuchungssystem stark in ihrer Flexibilität eingeschränkt. Die Impedanz des Hand-Arm Systems bei Rotationsanregungen bildet eine große Wissenslücke. Power-Tools weisen in Rotationsrichtung (beispielsweise Impulsschrauber) jedoch oftmals eine Hauptanregungsrichtung auf. Ebenfalls ist im Stand der Forschung weder in Translation noch in Rotation bekannt, ob die durch die Einflussfaktoren veränderte Impedanz des Hand-Arm Systems auch eine Auswirkung auf das Power-Tool selbst hat und deshalb zu Unsicherheiten im Entwicklungsprozess führt. Um die passiven Anwendereigenschaften für eine spezifische Impedanz bei der Entwicklung von Power-Tools simulieren und abbilden zu können, kommen Simulationsmodelle und mechanische Ersatzsysteme zum Einsatz. Diese mechanischen Ersatzmodelle sind als Ein- oder Zweimassen-Schwinger im Stand der Forschung für die Translationsrichtungen vorgestellt worden. Diese Ersatzsysteme sind bislang jedoch nicht auf verschiedene Einflussparameter der Impedanz einstellbar. Valide prüfstandstaugliche Modelle zur Abbildung der Impedanz für die Rotationsrichtung sind im Stand der Forschung nicht verfügbar.

3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

3.1 Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf Power-Tools und deren Beanspruchung in manuellen Tests

Bei der Interaktion zwischen Anwender und Power-Tool sind aktive und passive Komponenten des Anwenderverhaltens unterscheidbar. Das aktive Verhalten des Anwenders hat einen direkten Einfluss auf das Power-Tool Verhalten. Beispielsweise wäre die Bedienung einer Bohrmaschine ohne Andruckkraft nicht möglich. Naheliegend ist hierbei auch, dass veränderte Führungskräfte zu unterschiedlichen Power-Tool-Funktionen und Beanspruchungen führen können.

Das passive Verhalten ist für den Anwender nicht direkt und bewusst kontrollierbar. Es kann aber durch die Variation der Einflussfaktoren Greif- und Andruckkraft sowie durch die Haltung des Anwenders beeinflusst werden. Der Stand der Forschung beschreibt neben diesen drei Einflüssen die anthropometrischen Charakteristiken bzw. die Konstitution des Anwenders als weiteren Einflussfaktor auf die mechanische Impedanz (vgl. Abschnitt 2.3.5), der nicht durch das Power-Tool bestimmt ist. Die variierenden passiven Eigenschaften des Anwenders resultieren in einem variierenden mechanischen Übertragungsverhalten des Anwenders, das sich durch die mechanische Impedanz (vgl. Abschnitt 2.3.1) beschreiben lässt.

Ob und inwieweit der Einfluss variierender passiver Eigenschaften des Anwenders auf Power-Tools zu veränderten Beanspruchungen im Power-Tool führen kann, ist noch nicht ausreichend erforscht. Erkenntnisse hierfür sind jedoch notwendig, um den Detaillierungsgrad von Modellen ableiten zu können, welche die relevanten Eigenschaften des Anwenders bei der Validierung abbilden.¹⁵⁰

Erstes Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss der Variation der passiven Anwendereigenschaften auf ein Power-Tool aufzuzeigen und die Frage zu beantworten, ob diese zu veränderten Beanspruchungen in den untersuchten Power-Tools führen können. Da nach dem Stand der Forschung davon auszugehen ist, dass die passiven Anwendereigenschaften durch die hier untersuchten Einflussfaktoren besonders unter 100 Hz beeinflussbar sind, werden hierfür zwei Beispielsysteme mit starken Wechselwirkungen im niederen Frequenzbereich genutzt. Besonders relevante Power-Tool Gruppen sind in diesem Zusammenhang Bohrhämmer und die Gruppe der Schlag- und Impulsschrauber.

¹⁵⁰ Textteile des gesamten Abschnittes 3.1 wurden bereits in Matthiesen et al. 2018c veröffentlicht

3.2 Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Griff eines Power-Tools

Die passiven Eigenschaften des Anwenders lassen sich bislang nur in Laborversuchen am Anwender mittels Schwingungsanreger-Systemen erforschen. Im Stand der Forschung steht hierbei insbesondere die Erforschung der passiven Anwendereigenschaften bei translatorischen Schwingungsanregungen im Fokus. Neben den durch das Power-Tool vorgegebenen Einflussfaktoren wurden die Greif- und Andruckkraft, die Haltung und die anthropometrischen Charakteristiken bzw. die Konstitution des Anwenders als Einflussgröße auf die passiven Anwendereigenschaften erkannt. Viele Power-Tools, wie beispielsweise Schlag- und Impulsschrauber, weisen in einer Drehung periodische Interaktionen mit dem Anwender auf.

Im Stand der Forschung existieren bisher keine Erkenntnisse zur Veränderung der passiven Anwendereigenschaften durch die bekannten Einflussfaktoren bei periodischen Interaktionen in einer Drehung zur Unterarmachse, welche in der Anwendung direkt am Griff des Power-Tools erfasst wurden. Insbesondere fehlen hierbei Daten zur haltungsbezogenen Veränderung der passiven Anwendereigenschaften. Ebenfalls bietet der Stand der Forschung keine Vorgehensmodelle zur direkten Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Power-Tool an. Die Notwendigkeit aufwendige Versuchseinrichtungen zu nutzen lässt bislang keine Untersuchung in einer zur Realität vergleichbaren Anwendungssituation zu. Die direkt am Griff des Power-Tools vermessenen passiven Anwendereigenschaften und deren Variation bieten die Grundlage für die Entwicklung von Modellen zur Abbildung der passiven Anwendereigenschaften für die Validierung von Power-Tools.

Zweites Ziel dieser Arbeit ist es, eine neue Untersuchungsmethode an einem Beispielsystem zu entwickeln, um eine Analyse der passiven Anwendereigenschaften direkt am Griff des Power-Tools zu ermöglichen. Die Methode soll hierbei auf periodische Interaktionen in einer Drehung zur Unterarmachse fokussieren. Mit Hilfe dieser Methode soll die Beeinflussbarkeit der passiven Anwendereigenschaften durch die bekannten Einflussfaktoren im Stand der Forschung - Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders - bei der Benutzung eines Impulsschraubers untersucht werden.

3.3 Physische Modellierung der passiven Anwendereigenschaften

Um Unsicherheiten in kontinuierlichen physischen Validierungsaktivitäten in der Entwicklung (vgl. Abschnitt 1.1) reduzieren zu können, werden manuelle Gerätetests durch Versuche unter dem Einsatz von Prüfständen unterstützt. Sie bieten, im weitaus größeren Maße als manuelle Tests, die Möglichkeit, unter reproduzierbaren Bedingungen Entwicklungsalternativen gegeneinander vergleichen zu können. Um einer Entwicklung entgegenzuwirken, die auf ein einziges Anwendermodell optimiert ist, müssen die Anwendermodelle in Prüfständen im anwendungsspezifischen Rahmen ein- bzw. verstellbar sein. Durch die Einbindung von Modellen der aktiven Anwenderinteraktion kann das variierende Anwenderverhalten mit Aktor-Systemen steuernd und regelnd in Prüfständen abgebildet werden. Die Modellierung der passiven Anwender-Interaktionen gelingt hingegen nicht mit einem aktiven Regelkreis, da die Anregungsfrequenzen hoch sind und eine nicht ausreichende Aktor-Dynamik (regelungs- oder hardwareseitig) zu hohen Zwangskräften führen würde. Einen Lösungsansatz bieten hier mechanische, passiv wirkende Systeme, wie z.B. Mehrmassen-Schwinger. Diese Systeme müssen dynamisch gleichwertig zu den passiven Anwendereigenschaften (der mechanischen Übertragungsfunktion, der Impedanz) des Anwenders wirken. Im Stand der Forschung verfügbare Mehrmassen-Schwinger sind mit nicht verstellbaren Parametern aufgebaut und auf eine spezifische Anwenderimpedanz optimiert und bieten nicht die Möglichkeit eine Anwenderheterogenität ohne aufwendige Bauteilanpassungen abzubilden. Die meisten Modelle bilden dabei die translatorischen passiven Anwendereigenschaften ab. Modelle der passiven Anwendereigenschaften in einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung sind für periodisch anregende Power-Tools nicht verfügbar.

Drittes Ziel dieser Arbeit ist die Überprüfung der Realisierbarkeit eines physischen Modells, das die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in der Drehung zur Unterarmachse abbilden kann. Dieses soll eine einfache Einstellbarkeit auf verschiedene passive Anwendereigenschaften bieten. Das Modell und die Methode zu seiner Entwicklung soll hierbei auf periodische Interaktionen zwischen Impulsschrauber und Anwender fokussieren und sich an den Modellierungsansätzen der physischen Hand-Arm Modelle des Stands der Forschung orientieren.

4 Forschungsdesign

4.1 Forschungsvorgehen

Das Forschungsvorgehen dieser Arbeit gliedert sich in drei Forschungsphasen (Bild 4-1 oben), die in direktem Zusammenhang zu den drei in Kapitel 3 aufgeführten Forschungszielen stehen. Die Phasen sind in der Arbeit in drei Kapitel aufgeteilt. Dem Vorgehen überlagert sind fünf aufeinander aufbauende Forschungsschritte (Definition der Ziele, Ableitung der Forschungsfragen, die Analysephase, die Methodenentwicklung und die Methodenanwendung und -evaluierung), welche in Bild 4-1 links dargestellt sind und in jeder Phase durchlaufen werden.

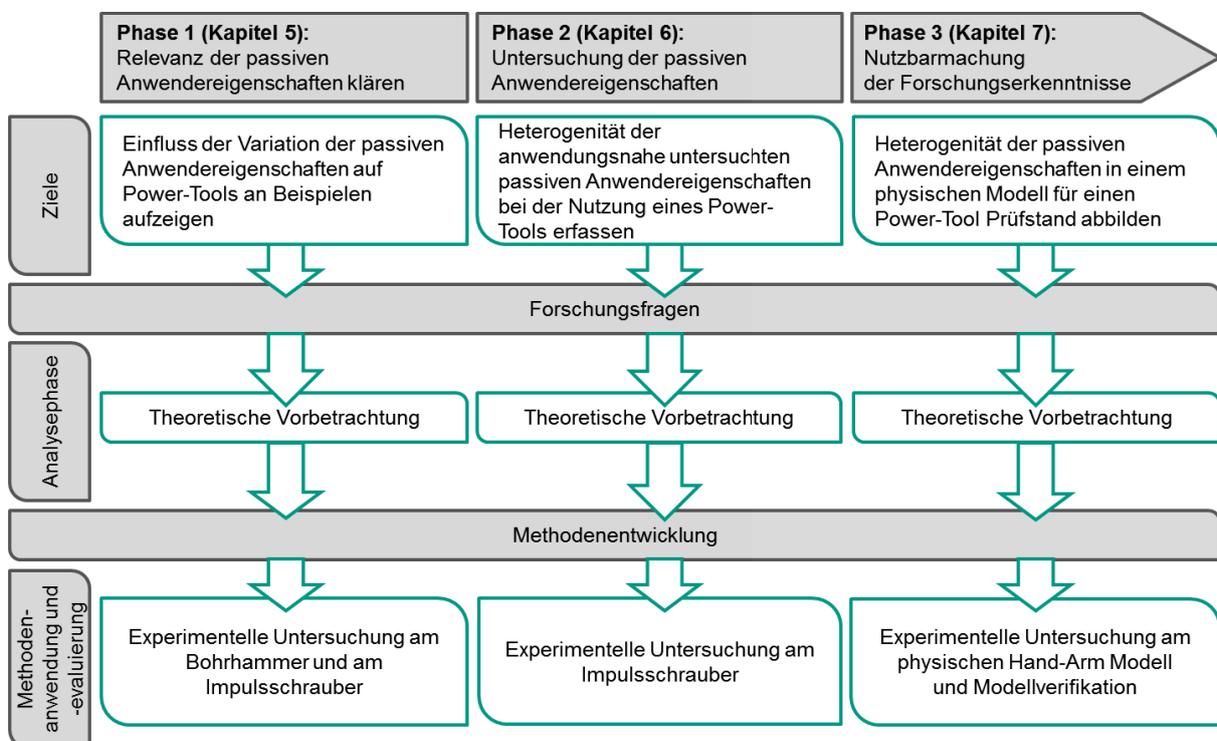


Bild 4-1: Visualisierung des Forschungsdesigns dieser Arbeit

In **Phase 1** wird die Relevanz der passiven Anwendereigenschaften untersucht. Hierbei wird bewertet, inwiefern variierende passive Anwendereigenschaften einen Einfluss auf Power-Tools und deren Beanspruchung während manueller Tests haben. Hieraus wird abgeleitet, ob die Variationen der Eigenschaften in Modellen, welche die passiven Anwendereigenschaften des Anwenders abbilden, zu berücksichtigen sind. Innerhalb **Phase 2** wird zunächst eine den Stand der Forschung erweiternde Methode entwickelt, um die passiven Anwendereigenschaften bei der Nutzung eines Power-Tools zu untersuchen. Mit Hilfe dieser Methode wird die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften erstmals direkt in der Anwendung am Impulsschraubergriff

erfasst. In **Phase 3** werden die erzielten Forschungsergebnisse für die Entwicklung von Power-Tools nutzbar gemacht. Hierfür werden Methoden bereitgestellt, wie die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in physischen Hand-Arm Modellen abgebildet werden kann. Das Forschungsvorgehen ermöglicht somit eine geschlossene Erforschung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften und der Möglichkeit zur Nutzung der Erkenntnisse für die Entwicklung von Hand-Arm Modellen für impulschrauber-ähnliche Power-Tool Prüfstände.

Die ersten beiden Forschungsschritte dienen der genaueren Klärung der Zielsetzung der Arbeit. Im ersten Schritt werden hierfür die **Forschungsziele** aus dem Stand der Forschung (für alle Phasen gemeinsam in Kapitel 3) abgeleitet. Zur Operationalisierung dieser Ziele werden im nächsten Schritt **Forschungsfragen** formuliert (ebenfalls gemeinsam für alle Phasen in Abschnitt 4.2), die durch diese Arbeit beantwortet werden sollen. Als dritter Schritt schließt sich die **Analysephase** an. Auf Basis einer theoretischen Betrachtung der Problemstellung wird eine anschließende Methodenentwicklung ermöglicht.

Die **Methodenentwicklung** befasst sich mit der Beschreibung der Herangehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen. Dies beinhaltet sowohl die Entwicklung von Messmitteln und Versuchsaufbauten als auch die Entwicklung von Analysemethoden beispielsweise durch Modellbildung. In diesem Schritt können auch bereits Teilforschungsfragen beantwortet werden.

Im abschließenden Schritt des Versuchsdesigns, der **Methodenanwendung und -evaluierung**, werden die entwickelten Untersuchungsmethoden in experimentellen Untersuchungen angewendet und Modelle verifiziert, um die Forschungsfragen abschließend zu beantworten.

Der Struktur des Forschungsvorgehens spiegelt sich in der Gliederung dieser Arbeit wider. Nach gemeinsamer Definition der Forschungsfragen in Abschnitt 4.2 erfolgt die Behandlung der drei Phasen in getrennten Kapiteln, die durch Abschnitte in die jeweiligen Forschungsschritte unterteilt sind.

4.2 Forschungsfragen

Um die Ziele der Arbeit zu konkretisieren werden drei zentrale Forschungsfragen formuliert, die in dieser Arbeit beantwortet werden. Diese drei Forschungsfragen werden wiederum in Teilforschungsfragen aufgegliedert, welche in Summe die systematische Beantwortung der zentralen Forschungsfragen ermöglichen.

Forschungsfrage 1: Einfluss der passiven Anwendereigenschaften

Haben die passiven Anwendereigenschaften, welche sich durch Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders verändern, einen Einfluss auf einen untersuchten Bohrhämmer und Impulsschrauber in manuellen Tests während der Hauptfunktionserfüllung und können diese zu veränderten Beanspruchungen führen?

- Wie kann der Einfluss auf ein Power-Tool quantifiziert werden?
- Mit welchen Mitteln lassen sich die aus dem Stand der Forschung bekannten Einflüsse auf die mechanisch-dynamischen Anwendereigenschaften bei einer Untersuchung einstellen?

Die Beantwortung der ersten Forschungsfrage ermöglicht eine Beurteilung, inwiefern die Variation der passiven Anwendereigenschaften, in mechanisch-dynamisch zum Anwender gleichwertigen Anwendermodellen, zu berücksichtigen ist.

Forschungsfrage 2: Untersuchung der veränderlichen passiven Anwendereigenschaften am Griff eines Impulsschraubers

In welcher Weise werden die passiven Anwendereigenschaften durch die Veränderung der Greif- und Andruckkraft, der Haltung und der anthropometrischen Charakteristiken bzw. der Konstitution des Anwenders bei der Benutzung eines Impulsschraubers beeinflusst?

- Welche Anforderungen stellen sich an eine Methode zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Griff eines Impulsschraubers?
- Welche Methode eignet sich zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschraubegriff und wie kann die Messung der Impedanz verifiziert werden?

Die Erkenntnisse aus der Bearbeitung der zweiten Forschungsfrage ermöglichen eine, bislang im Stand der Forschung nicht durchgeführte, Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften direkt am Griff eines Impulsschraubers. Im Weiteren legen die Erkenntnisse die Grundlage dazu, Ersatzmodelle zur Abbildung variierender passiver Anwendereigenschaften in Prüfständen für zum Impulsschrauber ähnliche Power-Tools entwickeln zu können.

Forschungsfrage 3: Physische Modellierung der passiven Anwendereigenschaften

Lässt sich die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in einem, zur Unterarm-Achse rotatorisch wirkenden, physischen Hand-Arm Modell für einen Impulsschrauber abbilden?

- Können Black-Box Modellierungsansätze aus dem Stand der Forschung genutzt werden, um die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften abzubilden?
- Wie kann ein theoretisches Black-Box Modell physisch umgesetzt werden?

Die Beantwortung der dritten Forschungsfrage ermöglicht eine Beurteilung, ob die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften durch physische Hand-Arm Modelle nachgebildet werden kann. Dies ermöglicht eine Aussage darüber, ob ein Einsatz solcher Modelle in einem Prüfstand für zum Impulsschrauber ähnliche Power-Tools möglich ist. Die passiven Anwendereigenschaften werden hierfür durch Veränderung der Greif- und Andruckkraft, der Haltung und der anthropometrischen Charakteristiken bzw. der Konstitution des Anwenders verändert.

5 Relevanz passiver Anwendereigenschaften in manuellen Power-Tool Tests

Im Zentrum von Kapitel 5 steht die Forschungsfrage, ob die passiven Anwendereigenschaften, die sich durch Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders verändern lassen, einen Einfluss auf einen untersuchten Bohrhämmer und Impulsschrauber in manuellen Tests während der Hauptfunktionserfüllung haben und ob diese zu veränderten Beanspruchungen führen können.

5.1 Theoretische Vorbetrachtung (Analysephase)

Die Subsysteme Anwender, Power-Tool und Werkstück bilden durch ihre Wechselwirkungen in der Anwendung ein Gesamtsystem und beeinflussen in diesem Gesamtsystem die Funktion und die Lebensdauer eines Power-Tools. Wesentlicher Teil dieser Wechselwirkungen sind die mechanischen Wechselwirkungen in Form von Kräften und Momenten. Die mechanischen Wechselwirkungen führen zu einer mechanischen Beanspruchung des Power-Tools. Bei der Validierung von Power-Tools ist die Vergleichbarkeit der mechanischen Beanspruchung von Power-Tool-Komponenten, beispielsweise in Lebensdaueruntersuchungen, von zentralem Interesse. Innerhalb dieses Kapitels wird geklärt, ob veränderte passive Anwendereigenschaften einen Einfluss auf die mechanischen Wechselwirkungen zwischen Anwender und Power-Tool und somit auf die entstehende Beanspruchung von Power-Tool-Komponenten während der Hauptfunktionserfüllung im Power-Tool haben können.

Die innere mechanische Beanspruchung lässt sich jedoch oft nicht ohne weitreichende Eingriffe in das System im Power-Tool erfassen und somit vergleichen. Hierfür wären entweder Messungen an Komponenten im System, beispielsweise durch integrierte Kraftmesstechnik, oder Aussagen über das Verschleißverhalten in Lebensdaueruntersuchungen unter immer gleichen Bedingungen nötig. Eine Kraftmesstechnik ist im Inneren von Power-Tools nur schwierig zu realisieren, da benötigte Bauräume nicht zur Verfügung stehen. Immer gleiche realitätsnahe Randbedingungen sind für Lebensdauertests nicht realisierbar. Um innerhalb dieser Arbeit den Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf die Beanspruchung des Power-Tools zu untersuchen, ist somit eine einfach messbare Größe zu definieren, anhand derer bewertet werden kann, ob veränderte passive Anwendereigenschaften die Beanspruchung von Power-Tools verändern können. Es wird hierbei folgende theoretische Überlegung zu Grunde gelegt:

Ein Power-Tool, das im Gesamtsystem aus Anwender, Power-Tool und Werkstück in einer Anwendung eingebunden ist, weist auf Grund der Wechselwirkungen von inneren und äußeren Kräften ein Bewegungsverhalten (beispielsweise eine Vibration oder eine makroskopische Bewegungsbahn) auf, welches durch die Subsysteme beeinflusst wird. Die inneren Kräfte resultieren hierbei beispielsweise aus der Drehzahl in Verbindung mit der Massenträgheit der Bauteile im Power-Tool, welche zwischen Antrieb und Wirkelement (Werkzeug) nötig sind. Zu den äußeren Kräften zählen beispielsweise Kräfte, die vom Anwender auf das Power-Tool ausgeübt werden, um Bewegungen des Power-Tools entgegenzuwirken oder auch solche Kräfte, die zwischen Wirkelement und Werkstück entstehen. Das Bewegungsverhalten des Power-Tools wird sich immer wieder gleich einstellen, wenn zum einen alle Kräfte von außen auf das Power-Tool gleich sind und zum andern im Power-Tool selbst keine Veränderungen stattfinden, welche die inneren Kräfte beeinflussen. Im Folgeschluss entspringt ein verändertes Bewegungsverhalten einer Veränderung der äußeren und/oder der inneren Kräfte. Es wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass sich im Fall eines veränderten Bewegungsverhaltens kein gleicher mechanischer Beanspruchungszustand im Power-Tool einstellt.

Es kann somit geschlossen werden, dass eine Veränderung der passiven Anwendereigenschaften, welche sich auf das Bewegungsverhalten des Power-Tools auswirkt, einen veränderten Beanspruchungszustand des Power-Tools zur Folge hat.

Die größte dynamische Beanspruchung auf die Komponenten innerhalb eines Power-Tools ist, bei sachgemäßer Verwendung, während der Erfüllung der Hauptfunktion bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Wirkrichtung am Power-Tool zu erwarten. Diese entspricht beispielsweise der Schlagzahl eines Bohrhammers oder der Schlagfrequenz eines Schraubers. Bei diesen Frequenzen wirken die größten Beschleunigungsänderungen auf die Komponenten innerhalb des Systems, die in Folge der Trägheiten zu großen Kräften führen. Eine Veränderung der Beschleunigung in diesem Frequenzbereich zieht eine direkte Veränderung der Belastung auf alle trägheitsbelasteten Komponenten nach sich.

Dies lässt sich an einem Beispiel verdeutlichen: Bei jedem Kompressionsvorgang innerhalb eines Bohrhammers wird das gesamte Power-Tool in Richtung Anwender beschleunigt (der spürbare Schlag). Alle Komponenten die sich im Kraftfluss zwischen Schlagwerkszylinder und Anwender befinden, werden durch entsprechende Lagerungen mit dem Power-Tool in gleiche Richtung beschleunigt. Auf die entsprechenden Lagerungen wirkt eine Kraft, die direkt proportional zur Masse der beschleunigten Teile und der Beschleunigung selbst ist. Eine Veränderung der Beschleunigung ist somit direkt mit einer Veränderung der Lasten auf die Lagerstellen verbunden.

Zusätzlich sind bei den Power-Tool-Hauptfrequenzen in Wirkrichtung die größten wirkenden Momente und Kräfte auf kritische Komponenten innerhalb des Antriebsstrangs zu erwarten. Auch dies lässt sich anhand eines Gedankenexperimentes nachvollziehen: Ein Schlagschrauber wird an der Abtriebsseite an einer senkrechten Wand fest eingespannt. Der Griff befindet sich in Ruhelage durch die Schwerkraft nach unten hängend. Bei jedem Momentenstoß durch den Schlagschrauber wird der Pistolengriff ausgelenkt und schwingt bei der Schlagfrequenz um eine sich ergebende ausgelenkte Lage (sofern der Griff genügend Trägheitsmoment um die Drehachse aufweist, um ein Durchdrehen über 180° gegenüber der Ruhelage zu verhindern). Die periodische Auslenkung des Griffes aus der ausgelenkten Lage und damit direkt verbunden die Winkelbeschleunigung des Griffes, ist direkt proportional zum wirkenden Moment innerhalb des Schlagschrauber-Antriebsstranges. Je größer die gemessene Winkelbeschleunigung am Griff um den gedachten festen Einspannpunkt an der Abtriebsseite ist, desto größer ist auch das wirkende Moment innerhalb des Antriebsstranges.

Es werden zusammenfassend folgende Grundannahmen zur Forschung getroffen, auf denen die Untersuchungen dieser Arbeit aufbauen. Es ist weder Ziel dieser Arbeit, diese Grundannahmen zu überprüfen noch sie zu widerlegen.

1. Grundannahme der Arbeit:

Gleiche mechanische Beanspruchungen des Power-Tools erfordern ein gleiches Bewegungsverhalten des Power-Tools in der Hauptanregungsrichtung.¹⁵¹

2. Grundannahme der Arbeit:

Falls die passive Anwendereigenschaft einen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Power-Tools bei der Power-Tool-Hauptfrequenz hat, so kann sie die Beanspruchung des Power-Tools verändern.

¹⁵¹ Der Umkehrschluss, dass gleiche Bewegungen immer zu gleichen Beanspruchungen führen ist hierbei explizit nicht Teil der Grundannahme. Wenn sich jedoch das Bewegungsverhalten verändert, so verändert sich auch die Beanspruchung.

Aus dem Stand der Forschung ist bekannt, dass sich die passiven Anwendereigenschaften aus den anthropometrischen Charakteristiken und der Konstitution des Anwenders ergeben und durch

- die Frequenz der Anregung,
- die Greiform,
- die Anregungsrichtung,
- die Armhaltung,
- die Greifkraft
- und die Andruckkraft

verändert werden können. Die Frequenz der Anregung, die Greiform und die Anregungsrichtung sind hierbei vom Anwender nicht direkt beeinflussbar, sondern hängen vom Power-Tool ab. Durch den Anwender beeinflussbar sind somit Armhaltung, Greifkraft und Andruckkraft. Durch die Variation des Anwenders selbst sind zusätzlich die anthropometrischen Charakteristiken und die Konstitutionen veränderbar. Inwiefern die einzelnen Veränderungen Einfluss auf das grundlegende Bewegungsverhalten eines Power-Tools und infolge dessen Einfluss auf die Beanspruchungen im Power-Tool haben können, ist bislang jedoch nicht geklärt. Innerhalb dieser Arbeit werden hierbei nur Einflussgrößen auf die passiven Anwendereigenschaften betrachtet, welche sich durch den Anwender selbst ergeben oder indirekt beeinflussen lassen. Diese sind:

- anthropometrische Charakteristiken und Konstitution (Anwender selbst),
- Armhaltung,
- Greifkraft
- und Andruckkraft.

Um den Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten zu untersuchen, muss zunächst eine Größe zur Quantifizierung des Bewegungsverhaltens definiert werden. Ziel ist hierbei die Definition einer skalaren vergleichbaren Messgröße in Form eines Effektivwertes. Ein Effektivwert reduziert hierbei die Messdauer auf einen einzigen Wert. Wenn sich dieser Wert ändert, kann das zugrundeliegende Bewegungsverhalten innerhalb des betrachteten Abschnitts nicht unverändert sein.

5.2 Ansatz zur Quantifizierung des Bewegungsverhaltens (Analysephase)

Eine in der Literatur im Zusammenhang mit Vibrationen von Power-Tools oft genutzte Größe bildet der Schwingungsgesamtwert der Effektivwerte der frequenzbewerteten Beschleunigung a_{hv} nach EN ISO 5349-1:2001-12. Für die Bewertung des

Bewegungsverhaltens ist dieser Wert jedoch nicht geeignet, da die Frequenzbewertung unabhängig von der Anregungsfrequenz und Richtung des Power-Tools ist. Es werden deshalb auch Oberschwingungen des Power-Tools, die beispielsweise durch Eigenfrequenzen des Gehäuses entstehen, in den Effektivwert einbezogen. Dennoch bietet die EN ISO 5349-1:2001-12 wertvolle Richtwerte für eine sinnvolle Messdauer, um valide Effektivwerte zu ermitteln. Des Weiteren werden Stellen für die Vibrationssensor-Ankopplung vorgeschlagen. Eine einfacher zu interpretierende Größe bildet der Effektivwert der Beschleunigung im Bereich der Power-Tool-Hauptfrequenz, der das grundlegende Bewegungsverhalten des Power-Tools bei der Hauptanregung widerspiegelt.

Um den Effektivwert der Beschleunigung im Bereich der Power-Tool-Hauptfrequenz zu errechnen, ist eine Bandpass-Filterung der Beschleunigungssignale in einem Frequenzbereich um diese Hauptfrequenz notwendig. Die absolute Definition der Breite dieses Frequenzbereichs ist für die Bandpassfilterung hierbei jedoch nicht zielführend. Die Power-Tool-Hauptfrequenz f_{HF} unterliegt Schwankungen durch Anwender- und Werkstückinteraktionen, wobei diese typischerweise bei höheren Hauptfrequenzen auch höher ausfallen. Durch das Filter soll die Hauptanregung auch nicht bei Schwankungen der Hauptfrequenz gedämpft werden. Zeitgleich sollen jedoch die Oberschwingungen, also vielfache der Hauptfrequenzen in geeignetem Maße gefiltert werden. Um diese Forderungen zu erfüllen, wird in dieser Arbeit ein Butterworth-Bandpassfilter genutzt. Die Filterparameter des Bandpasses W_{HF} werden festgelegt zu:

$$f_{Grenz\ unten\ 3dB} = 0,75 \cdot f_{HF}; f_{Grenz\ oben\ 3dB} = 1,25 \cdot f_{HF}; 8. Ordnung$$

Hierdurch ergeben sich die in Bild 5-1 dargestellten exemplarischen, an vier Frequenzen dargestellten, Frequenzgänge des Filters. Die Bandpassfilter weisen einen Durchlassbereich mit einem Verstärkungsfaktor von nahezu 1 für den Bereich +/- 10% zur Power-Tool-Hauptfrequenz auf. Bei jeweils der doppelten Frequenz (1.Oberschwingung) ergibt sich ein Verstärkungsfaktor von kleiner 0,05. Während somit Schwankungen der Power-Tool-Hauptfrequenz von kleiner +/- 10% passieren können, werden Oberschwingungen ausreichend gedämpft.

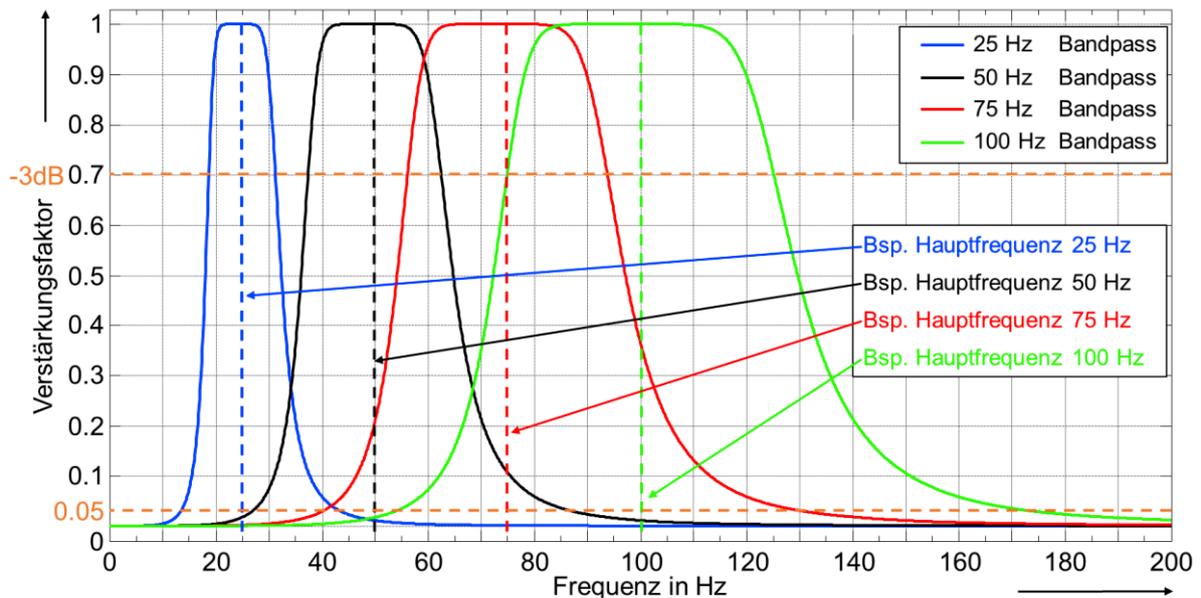


Bild 5-1: Frequenzgänge der Bandpassfilterung um die Power-Tool-Hauptfrequenz für vier exemplarische Frequenzen

Der Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in einer Raumrichtung a_{HF} ergibt sich nach Bild 5-2 durch die Bandpassfilterung der Beschleunigung $\ddot{x}_{x,y,z}(t)$ mit W_{HF} .

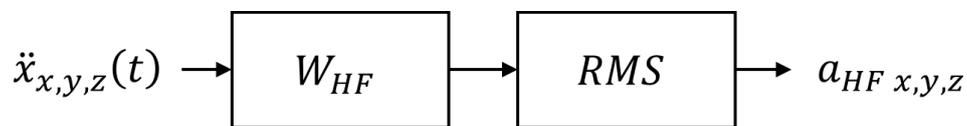


Bild 5-2: Berechnung des Effektivwertes aus der Beschleunigung

Der relevante Wert ist dabei innerhalb dieser Arbeit der Wert in Wirkrichtung (Hauptanregungsrichtung) des Power-Tools, da hier die größten Beschleunigungsamplituden auftreten und hierdurch die Belastungen auf die Komponenten maximal werden. Es wird der Effektivwert der Beschleunigung des Power-Tools bei der Hauptfrequenz in Wirkrichtung (Hauptanregungsrichtung) a_{HFw} nach Gl. 5-1 definiert, wobei gefordert wird, dass die drei Richtungen entlang der zu erwartenden Hauptanregungsrichtungen liegen müssen. Falls dies nicht aus einer theoretischen Betrachtung geschlossen werden kann, so ist durch eine entsprechende Sensor-Positionsverschiebung ein Koordinatensystem der Maxima zu bestimmen. Hinweise hierzu gibt auch EN ISO 5349-1:2001-12.

$$a_{HFw} = \max \left\{ \sqrt{a_{HFx}^2}; \sqrt{a_{HFy}^2}; \sqrt{a_{HFz}^2} \right\} \quad \text{Gl. 5-1}$$

Innerhalb der nachfolgenden Untersuchungen zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten eines Beispielgerätes wird eine Einschätzung darüber erlangt, ob der Effektivwert der Beschleunigung des Power-

Tools a_{HFw} bei der Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung eine geeignete Größe ist, um die Auswirkungen veränderlicher passiver Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten und somit, gemäß den Grundannahmen aus Abschnitt 5.1, auf die Beanspruchung des Power-Tools zu untersuchen. Hierfür muss sich der Effektivwert der Beschleunigung des Power-Tools a_{HFw} bei der Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung sensitiv gegenüber Veränderungen der untersuchten Einflussfaktoren zeigen. Als zu untersuchende Einflussfaktoren auf die passiven Anwendereigenschaften werden die vier Faktoren Heterogenität der anthropometrischen Charakteristiken und Konstitution, Armhaltung, Greif- und Andruckkraft gewählt (vgl. Abschnitt 5.1).

5.3 Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Bohrhammers (Methodenentwicklungsphase)

Als erstes Beispielsystem für die durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss veränderlicher passiver Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten von Power-Tools bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung wird ein Bohrhammer gewählt. Die Methode wurde in Zusammenarbeit mit STELZER¹⁵² und TRÜNKLE¹⁵³ entwickelt. Eine Beschreibung wurde ebenfalls in MATTHIESEN ET AL.¹⁵⁴ und MATTHIESEN ET AL.¹⁵⁵ publiziert. Die genannten Publikationen werden innerhalb dieses Abschnitts, soweit sie im direkten Kontext zu dieser Arbeit stehen, aufbereitet, erweitert und vorgestellt.

Die Angaben des Stands der Forschung zu den passiven Anwendereigenschaften beziehen sich vorwiegend auf eine einhändige Bedienung von Power-Tools. Es besteht bislang kein Konsens über die Übertragbarkeit der Ergebnisse von einer Ein- auf eine Zwei-Hand-Bedienung. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb ein Bohrhammer gewählt, der sich für eine Ein-Hand-Bedienung in allen Arbeitshaltungen eignet. Auf Grund der Kompaktheit und des Gewichts (3,4 kg) wird der Bohrhammer DHR 243 von Makita gewählt, welcher über eine Einzelschlagenergie von 2 J verfügt. Die Einzelschlagenergie macht ein breites Einsatzgebiet für Bohrungen bis 24 mm Durchmesser in Beton möglich¹⁵⁶.

Zur Untersuchung des Einflusses der passiven Anwenderinteraktionen auf das Bewegungsverhalten in Form des Beschleunigungseffektivwertes des Power-Tools,

¹⁵² vgl. Stelzer 2014 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

¹⁵³ vgl. Trünkle 2015 (vom Autor co-betreute Bachelorarbeit)

¹⁵⁴ vgl. Matthiesen et al. 2015

¹⁵⁵ vgl. Matthiesen et al. 2018c

¹⁵⁶ vgl. Makita Werkzeuge GmbH 2016

müssen die aktiven Anwenderinteraktionen konstant gehalten werden. Im Falle eines Bohrhammers betrifft dies vor allem die Andruckkraft in Richtung der Bohrachse und die Greifkraft des Anwenders am Griff. Es ergibt sich somit die Aufgabe, die Andruck- und Greifkraft während des Betriebes kontinuierlich messen zu können und dem Probanden im Vergleich zu einem Soll-Wert zu visualisieren. Weiter ist der Einfluss der Armhaltung von Interesse, weswegen diese während der Versuche kontrollierbar sein muss.

5.3.1 Messgriff zur Aufnahme der Andruck- und Greifkraft sowie der Power-Tool-Vibration

Um eine Messung der Kräfte zu ermöglichen, wird der Bohrhammer im Bereich des Griffs und der Griffanbindung wie in Bild 5-3 dargestellt modifiziert. Der ursprüngliche Griff wird an den Stellen 1 und 2 vom Bohrhammer abgetrennt. An diese Schnittstellen fügt sich ein neu gefertigter Griff an, der durch zwei Kraftmess-Elemente (3 und 4) an das ursprüngliche Bohrhammergehäuse angekoppelt wird.

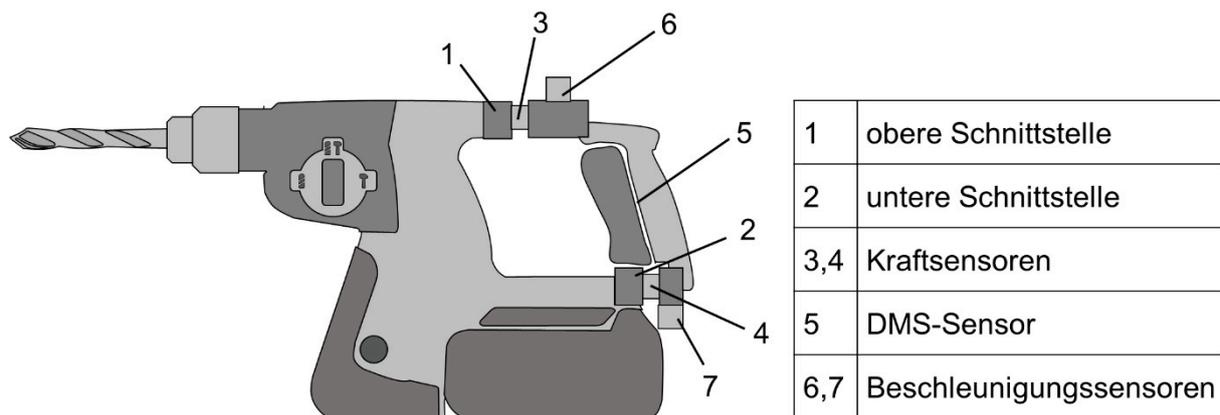


Bild 5-3: Schematische Darstellung des modifizierten Bohrhammers zur Messung der Andruck- und Greifkraft¹⁵⁷

Die Messung der Greifkraft erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 10819:2013-12 als Kraft zwischen der vorderen Grifffälfte und hinteren Grifffälfte (5). Um diese messen zu können, ist ein abgewandelter Griff notwendig, welcher die Implementierung eines Kraft-Sensorelementes zwischen vorderer und hinterer Grifffälfte ermöglicht. Der neu gefertigte Griff ist auf Basis der ursprünglichen Griffkontur erstellt, um eine gleichbleibende Griffform zu erhalten. Hierfür wird der ursprüngliche Griff mittels Silikonformen abgeformt und mit Hilfe von Epoxidharz (Resinpal 2301) neu modelliert. Eine Realisierung der Greifkraftmessung mittels Kraft-Sensorelementen auf Piezo-Basis, wie in DIN EN ISO 10819:2013-12 vorgeschlagen, ist aus Gründen der Sensorverfügbarkeit nicht möglich. Da das Sensorelement jedoch die quasistatische

¹⁵⁷ Matthiesen et al. 2018c, S. 161 (modifizierte Abbildung)

Greifkraft und somit keine dynamischen Kräfte auflösen muss, wie dies in DIN EN ISO 10819:2013-12 gefordert wird, ist eine Messung auf DMS-Basis zulässig. Das Sensorelement basiert auf einem drei-Punkt-Biegebalken auf welchem zwei DMS-Vollbrücken (jeweils ein DMS „HBM 3/350DK21/0“ mit zwei parallelen linearen Messgittern auf der Ober- und Unterseite des Biegebalkens) appliziert sind (siehe Bild 5-4). Die zwei DMS Vollbrücken werden jeweils durch einen „elan MBP 6218 Signalverstärker“ verstärkt.

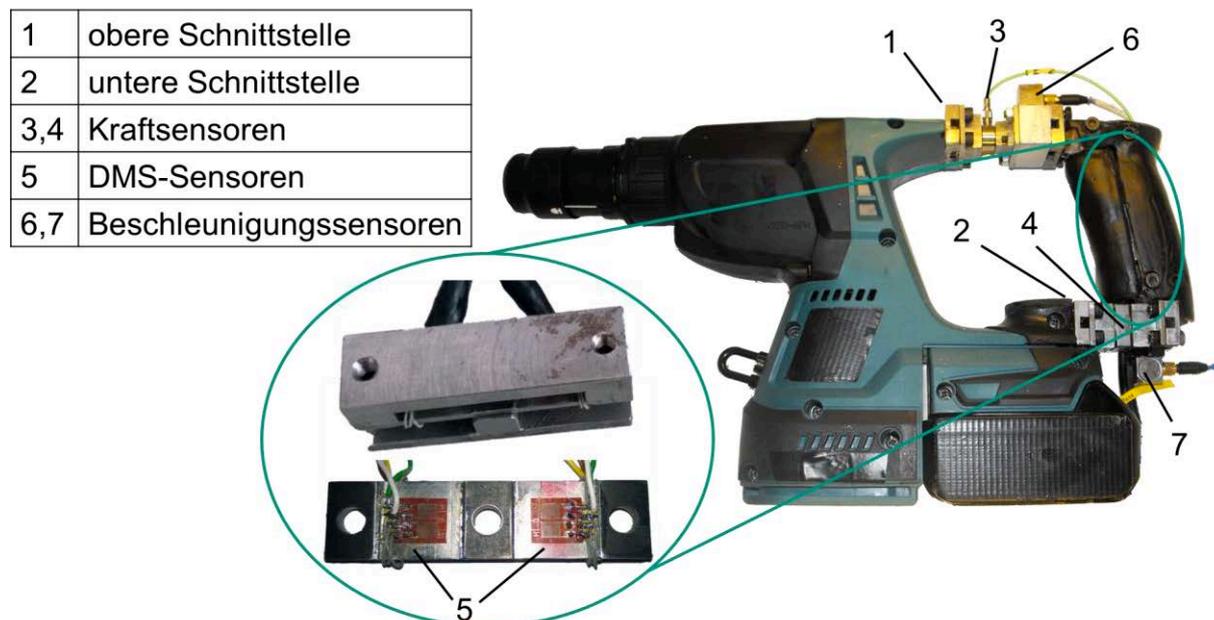


Bild 5-4: Modifizierter Bohrhammer und drei-Punkt-Biegebalken¹⁵⁸ mit applizierten DMS zur Messung der Greifkraft im Bohrhammergriff¹⁵⁹

Das Sensorelement ist durch Epoxidharz in die neu modellierten Griffhalbschalen eingebunden und in der hinteren Griffschale durch zwei zusätzliche Schrauben gesichert.

Um den neu modellierten Griff mit integriertem Kraft-Sensorelement an das Bohrhammergehäuse anzubinden, sind in den Schnittstellen (1 und 2) Verbindungspunkte aus Stahl mittels Epoxidharz (Resinpal 2301) in das Bohrhammergehäuse eingebracht. An der Schnittstelle 1 verbindet ein Piezo-Kraftsensor (3) das Bohrhammergehäuse mit dem neuen Griff. Der ein-Achs Kraftsensor Kistler 9011 ist hierbei in der Bohrachse angeordnet und misst die Kraft in eben dieser Richtung. An der Schnittstelle 2 verbindet ein drei-Achs Kraftsensor Kistler 9251A (4) das Gehäuse mit dem Griff. Er ist hierbei so angeordnet, dass sowohl die Kraft in Richtung der Bohrachse als auch die Kraft quer zu Griff- und Bohrachse

¹⁵⁸ Stelzer 2014 (vom Autor co-betreute Masterarbeit), S. 62 (modifizierte Abbildung)

¹⁵⁹ Stelzer 2014 (vom Autor co-betreute Masterarbeit), S. 68 (modifizierte Abbildung)

gemessen werden können. Beide Kraftsensoren sind vorgespannt und können hierdurch sowohl Druck- als auch Zug-Kräfte aufnehmen. Die Signale der Kraft-Sensoren werden durch den Ladungsverstärker Kistler 5073A211 konditioniert und verstärkt.

Nach einer Eignungsprüfung, wird der Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Bohrhammers als Kenngröße für den Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten des Power-Tools herangezogen. Nach EN ISO 5349-2:2001-12 ist für die Ermittlung der Vibration im Falle eines Bohrhammers ohne Schwingungsentkopplung, wie er hier vorliegt, eine Messung der Beschleunigungen in Richtung der Bohrachse ausreichend für die Bestimmung des Beschleunigungseffektivwertes. Da jedoch keine Aussage über die Steifigkeit des modifizierten Griffes getroffen werden kann, wird der Empfehlung EN ISO 5349-2:2001-12 nachgekommen, einen Beschleunigungssensor über und einen unter der Hand (6 und 7) zu platzieren. Die beiden drei-Achs Beschleunigungssensoren PCB 356A02 werden in direkter Nähe zu den Kraftsensoren mittels Mounting Plates¹⁶⁰ angebracht. Der obere Sensor (6) misst hierbei, analog zum Kraftsensor, die Beschleunigung in Richtung der Bohrachse, während der untere Beschleunigungssensor zusätzlich die Beschleunigung quer zur Griff- und Bohrachse aufnimmt. Beide Sensoren werden über den Ladungsverstärker PCB 482C05 verstärkt. Das aufgebaute Gesamtsystem ist in Bild 5-4 dargestellt.

Das Gerätegewicht hat sich durch die Modifikation von ~ 3,3 kg auf ~ 3,9 kg erhöht. Die Gewichtszunahme ist jedoch bzgl. der Beantwortung der Forschungsfragen nicht relevant. Der hier ausgewählte Bohrhammer ist lediglich ein Beispielsystem um die Frage zu beantworten, ob die passiven Anwendereigenschaften einen Einfluss auf einen untersuchten Bohrhammer in manuellen Tests haben. Das ausgewählte Beispielsystem ist hierbei beliebig und könnte auch ein Bohrhammer sein, der ohne Modifikation dieses Gewicht aufweist.

5.3.2 Anzeige der Soll- und Istwerte der Andruck- bzw. Greifkraft für den Probanden

Um dem Probanden eine Möglichkeit zur Einnahme der gewünschten Andruck- und Greifkräfte zu geben ist ein System nötig, welches ihm die aktuellen Kräfte im Bezug zu einem Sollwert darstellt. Die Auffrischungsrate der Darstellung muss hierfür während der Versuche einerseits schnell genug sein, um dem Probanden ein direktes Feedback zu ermöglichen, und andererseits träge genug, um die Daten in geeignetem

¹⁶⁰ Ein Anschraubpunkt für Beschleunigungssensoren der mittels Klebstoff angebracht wird

Maße zu glätten und den Probanden nicht mit einer schnell wechselnden Anzeige zu irritieren. In DIN EN ISO 10819:2013-12 wird für Anzeigen von Andruck- und Greifkräften eine Auffrischungsrate der Anzeige von 0,25 bis 0,5 s vorgeschlagen.

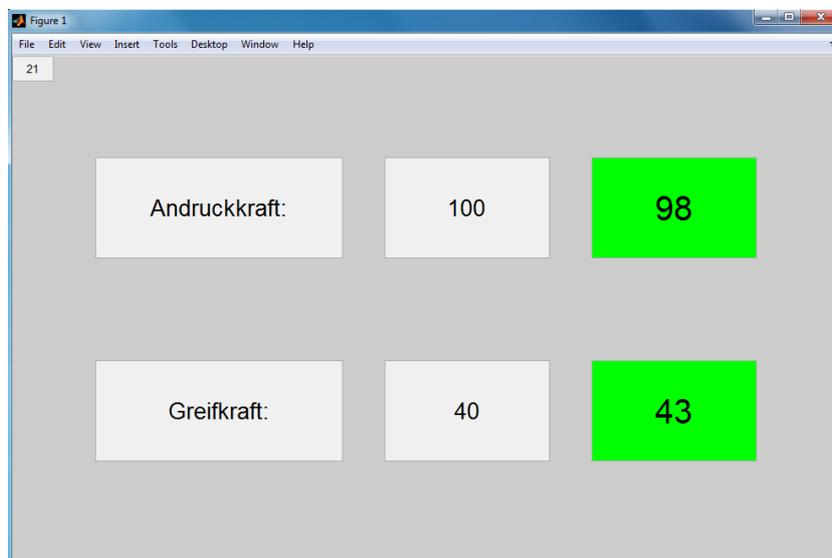


Bild 5-5: Anzeige der Soll- und Istwerte der Andruck- bzw. Greifkraft für den Probanden¹⁶¹

Das System zur Anzeige der Soll- und Istwerte der Andruck- bzw. Greifkraft ist als MATLAB® Anzeige umgesetzt (Bild 5-5), die dem Probanden auf einem vor ihm befindlichen Monitor ausgegeben werden kann. In der Anzeige finden sich in der mittleren Spalte die jeweiligen Soll-Werte als Vorgabe. In der rechten Spalte werden die Ist-Werte angezeigt. Um eine einfache Auffassung zu ermöglichen, werden die Zahlen durch Farbstufen hinterlegt, wobei grün einer Abweichung von +/-10% des Soll-Werts vom Ist-Wert entspricht. Die Anzeige wird mit einer Auffrischungsrate von 0,25 s realisiert.

5.3.3 Kontrolle der Armhaltung des Probanden

Die passiven Anwendereigenschaften werden nach dem Stand der Forschung sowohl durch die aktiven Kräfte des Anwenders wie auch durch die Armhaltung des Anwenders beeinflusst. Um den Einfluss der Armhaltung auf das Bewegungsverhalten des Power-Tools zu untersuchen, ist eine Methode zur Kontrolle der Armhaltung des Probanden notwendig. Zu diesem Zweck wird eine Kombination aus einer Kamera und einer segmentierten Wand hinter dem Probanden genutzt. Die Kamera ist hierbei in einer Flucht mit der segmentierten Wand und dem Probanden positioniert, so dass das in Bild 5-6 schematisch dargestellte Bild entsteht. Das Live-Bild wird dem Versuchsleiter auf einem zusätzlichen Bildschirm angezeigt, sodass dieser die

¹⁶¹ Trünkle 2015 (vom Autor co-betreute Bachelorarbeit), S. 28

Möglichkeit hat, mittels Vergleichsbildern die Armhaltung des Probanden durch Versuchsanweisungen zu korrigieren.

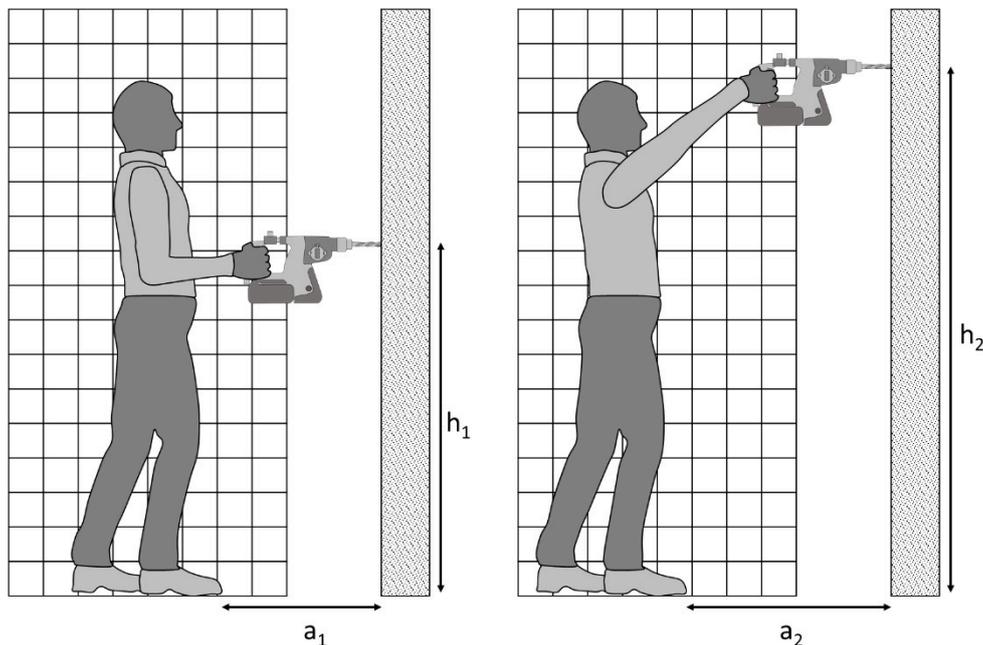


Bild 5-6: Aufbau zur Kontrolle der Armhaltung des Probanden am Bohrhammer

In durchgeführten Vorversuchen zur Überprüfung dieser Methode hat sich gezeigt, dass mit der Vorgabe des Fußabstandes a und der Höhe der Hand h durch den Probanden intuitiv eine stets gleiche, für den Probanden bequeme Armhaltung eingenommen wird. Die Methode dient somit vor allem der Kontrolle der Armhaltung in der Auswertung der Versuchsreihen.

5.3.4 Modell der Anwendung und der Umwelt für die Versuche

Um den Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf die Vibration und somit das Bewegungsverhalten aufzuzeigen, muss die reale Anwendung des Power-Tools im Labor modellhaft abgebildet werden. Für den Bohrhammer wird das Schlagbohren in Betonuntergrund für leichte Installationsarbeiten als Modellanwendung gewählt. Installationsarbeiten werden oft einhändig durchgeführt um in ausgestreckten Armhaltungen arbeiten zu können. Hier kommen üblicherweise geringe Bohrdurchmesser bis 12 mm zum Einsatz.

Für die Versuche ist es essentiell wichtig, dass der Einfluss von Umwelt und Anwendung (beispielsweise die Gerätetemperatur, der Verschleiß des Bohrers oder die Beschaffenheit des Untergrundes) auf die Vibration in den Versuchsreihen möglichst konstant gehalten wird. Da aus theoretischen Überlegungen keine Aussage hierüber getroffen werden kann, wird dieser Aspekt in der späteren Versuchsdurchführung vorab betrachtet (siehe Abschnitt 5.4.2).

Bei der modellierten Anwendung ist es weiter wünschenswert, dass sie einer realen Anwendung des Power-Tools nahekommt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Zeitgleich ist für die Untersuchung der Power-Tool-Vibration eine angemessene Einzelversuchszeit nötig, um konstante Bedingungen zu ermöglichen. EN ISO 5349-2:2001-12 schlägt hierbei Einzelversuchszeiten von mehr als 8 s vor. Die Versuchszeit lässt sich einerseits durch den verwendeten Bohrdurchmesser als auch durch das verwendete Untergrundmaterial beeinflussen. In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass sich eine Versuchszeit von 8 s mit für den verwendeten Bohrhammer anwendungstypischen Bohrdurchmessern von bis zu 12 mm nur durch anwendungsuntypische tiefe Löcher in Beton realisieren lässt. Da die Bohrtiefe in den durchgeführten Versuchen weiter aus Gründen der Handhabbarkeit der Untergründe nicht realisiert werden kann, wird die Einzelversuchsdauer auf 6 s verkürzt. Innerhalb dieser Studie soll jedoch auch keine Aussage über den für Hand-Arm-Schwingungen relevanten Beschleunigungseffektivwert nach EN ISO 5349-2:2001-12 getroffen werden, wodurch eine Versuchszeitverkürzung, sofern bei jedem Einzelversuch gleich, nicht als relevant betrachtet wird. Für die Versuche wird der Bohrdurchmesser 12 mm (Makita SDS-4Plus Hammerbohrer: 2 Schneider) in Kombination mit 8 cm starkem Tiefbordstein aus Beton gewählt. Zwei senkrecht gestellte Betonsteine werden übereinander gestellt in einem Holzgestell an der Wand fixiert, um Versuche in verschiedenen Armhaltungen zu ermöglichen.

5.3.5 Messkette und Datenerfassung

Alle Daten werden durch eine PCI-Multi-I/O-Schnittstelle von National Instruments (NI PCI-6229) mit einer Abtastrate von 20 kHz erfasst. Die gesamte Messkette ist in Bild 5-7 dargestellt.

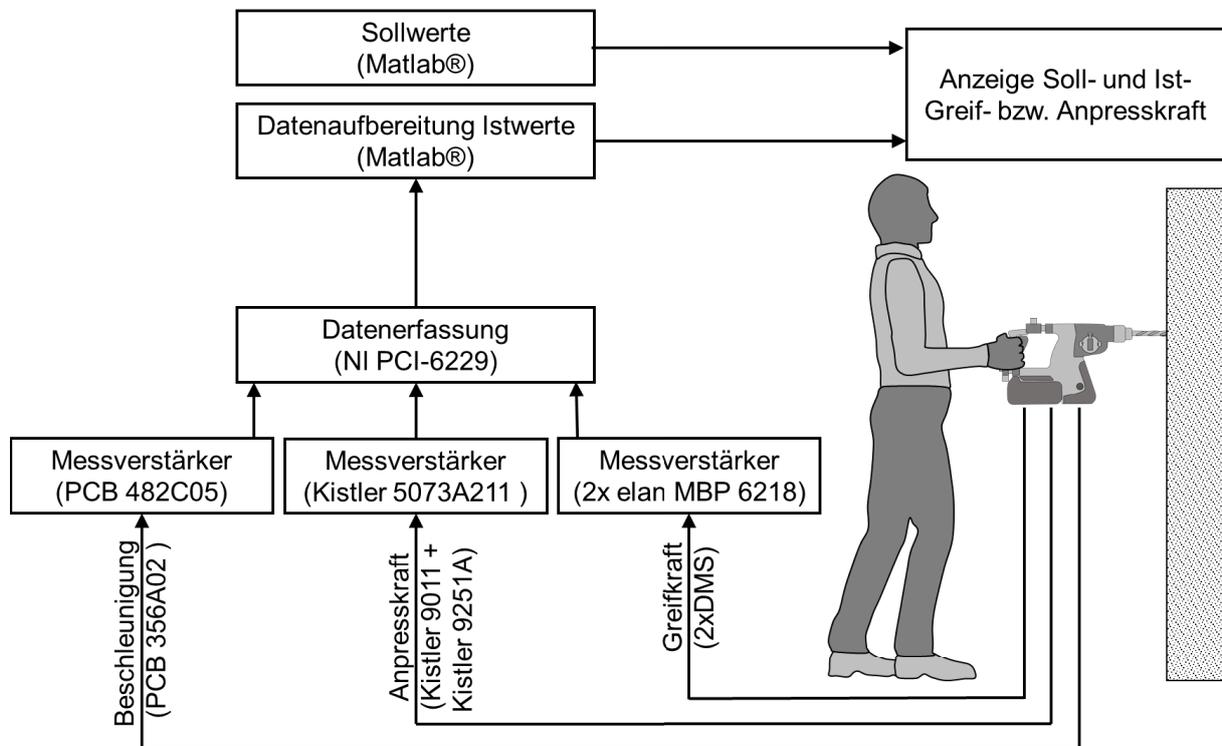


Bild 5-7: Messkette zur Kontrolle der aktiven Anwenderinteraktionen und Erfassung der Vibrationen am Power-Tool-Griff

Der Versuchsaufbau zur Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften auf die Vibration eines Bohrhammers ist in Bild 5-8 illustrierend dargestellt.

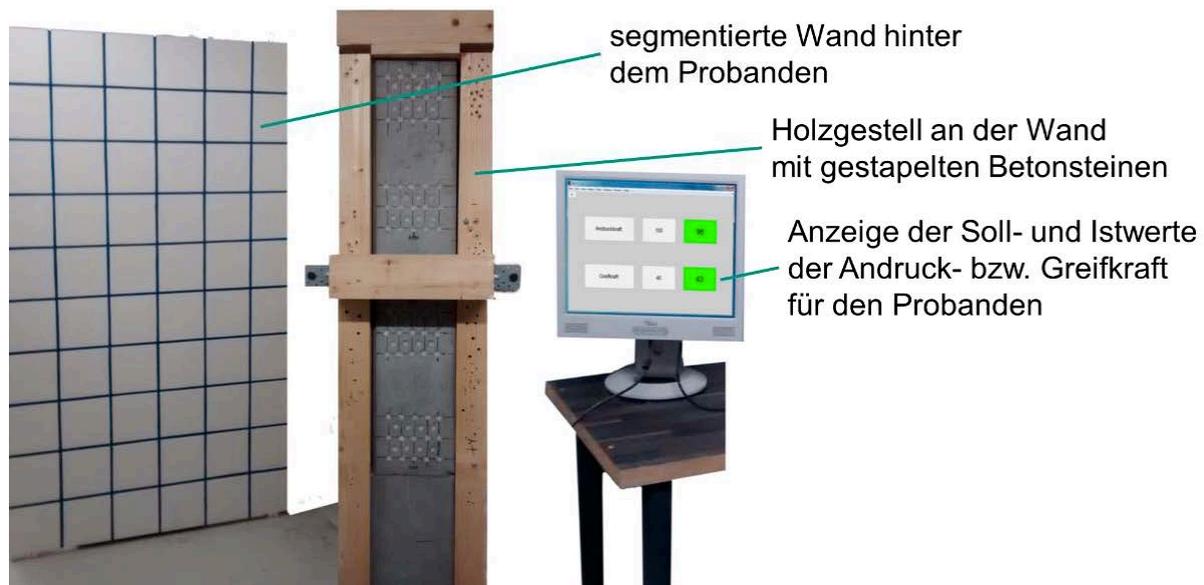


Bild 5-8: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften¹⁶²

5.4 Untersuchung des Einflusses veränderlicher passiver Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Bohrhammers (Methodenanwendungs- und Methodenevaluierungsphase)

Innerhalb dieses Abschnittes wird geklärt, ob sich der Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} sensitiv gegenüber Greif- und Andruckkraft und Haltungs- und Personenvariation zeigt und zur Quantifizierung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften auf den Bohrhammer dienen kann. Dieser Effektivwert spiegelt dabei das dominierende Bewegungsverhalten des Power-Tools wider. Die notwendigen Grundlagen zur Messdatenverarbeitung können Abschnitt 5.2 entnommen werden. Die einzelnen Einflussfaktoren der passiven Anwendereigenschaften werden unter Nutzung der in Abschnitt 5.3 entwickelten Methoden variiert. Die Heterogenität der anthropometrischen Charakteristiken bzw. der Konstitution - wird durch die Variation des Probanden untersucht. Unter Einbezug der Grundannahmen aus Abschnitt 5.1 wird innerhalb der Versuche zeitgleich überprüft, ob die durch Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders veränderlichen passiven Anwendereigenschaften einen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des untersuchten Bohrhammers in manuellen Tests haben und deshalb zu veränderten Beanspruchungen im Power-Tool führen können. Das Ziel ist hierbei die Erkenntnis, ob die einzelnen Einflussfaktoren der passiven

¹⁶² Matthiesen et al. 2018c, S. 162 (modifizierte Abbildung)

Anwendereigenschaften unter kontrollierten Randbedingungen überhaupt einen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Power-Tools haben und somit Beanspruchungen verändern können. Ziel ist jedoch keine breite Kenntnis der Einflussstärke über viele Faktorstufen.

Die hier vorgestellten Versuche wurden in enger Zusammenarbeit mit TRÜNKLE¹⁶³ durchgeführt. Diese Arbeit nutzt die reinen Versuchsdaten und wertet diese im Kontext des Ziels der Arbeit neu aus. Die Ergebnisse wurden bereits in MATTHIESEN ET AL.¹⁶⁴ publiziert und werden innerhalb dieses Abschnitts, den direkten Kontext dieser Arbeit betreffend, aufbereitet und erweitert vorgestellt.

5.4.1 Versuchsdesign

Die Versuchsmethoden, die den Versuchen zu Grunde liegen, wurden in Abschnitt 5.3 vorgestellt. Als Versuchsdesign wird ein zweistufiger vollfaktorieller Versuchsplan der Parameter Person, Haltung, Greif- und Andruckkraft gewählt, da keine in einer Funktion beschreibbaren Abhängigkeiten der Parameter auf den Beschleunigungseffektivwert unterstellt werden kann und somit keine verkürzten Versuchspläne genutzt werden können. Die untersuchten Faktorstufen sind in Tabelle 5-1 dargestellt.

Die verwendeten Faktorstufen für Greif- und Andruckkraft sind hierbei in Vorversuchen entwickelt worden. Bei der Greifkraft bildet sich die untere Faktorstufe aus dem gerundeten Wert, der für die Probanden gerade ausreicht, dass Gerät angenehm zu halten. Die obere Faktorstufe wird so bestimmt, dass die Einnahme der Greifkraft über den gesamten Versuchszeitraum möglich ist, ohne zu einer gefühlten Überanstrengung der Muskeln zu führen.

Auf die Untersuchung an einer größeren Probandengruppe wird verzichtet, da die Erkenntnis, ob schon zwei einzelne Probanden unter kontrollierten Randbedingungen einen Einfluss auf das Bewegungsverhalten haben und somit die Beanspruchung verändern können, im Vordergrund steht¹⁶⁵. Der Fokus bei der Probandenauswahl liegt somit darauf, möglichst verschiedene anthropometrische Charakteristiken zu erhalten. Da die Körpergröße die Haltung des Probanden stark beeinflussen würde, liegt der Fokus der Probandenauswahl auf möglichst verschiedenen Körpergewichten bei vergleichbarer Körpergröße.

¹⁶³ vgl. Trünkle 2015 (vom Autor co-betreute Bachelorarbeit)

¹⁶⁴ vgl. Matthiesen et al. 2018c

¹⁶⁵ Hier wird nicht der Beweis erbracht, dass dies bei allen Probanden zutreffend wäre. Der Nachweis kann aber erbracht werden, dass es zumindest zwei Probanden gibt in denen diese Aussage zutrifft.

Tabelle 5-1: Übersicht über die durchgeführten Versuche zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf die Beschleunigungseffektivwerte des Bohrhammers

	Faktorstufen Ausprägung	
	Stufe 1 (-)	Stufe 2 (+)
Untersuchte Haltungen	Haltung 1 „Vor der Brust“ (vgl. Bild 5-6 links)	Haltung 2 „Über Kopf“ (vgl. Bild 5-6 rechts)
Untersuchte Probanden	Proband 1 (m) Körpergröße: 1,72 m Gewicht: 107 kg Alter: 30-35 Jahre	Proband 2 (m) Körpergröße: 1,72 m Gewicht: 63 kg Alter: 20-25 Jahre
Untersuchte Greifkräfte	40 N	80 N
Untersuchte Andruckkräfte	60 N	100 N
Wiederholungen	mind. 10	
Mittelungszeit für Schwingungswert	6 s	

Der Beschleunigungseffektivwert wird, wie in Abschnitt 5.2 vorgestellt, ermittelt. Da am Messgriff zwei Beschleunigungssensoren angebracht sind, werden die Beschleunigungseffektivwerte der beiden Sensoren gemittelt.

Für jeden einzelnen Versuch wird folgendes Versuchsvorgehen festgelegt:

- 1) Rücksetzen der Kraft-Sensorelemente auf Piezo-Basis
- 2) Aufnahme des Bohrhammers durch den Probanden und Einnahme der korrekten Haltung mit Hilfe von Markierungen auf dem Boden und Anweisungen des Versuchsleiters auf Basis des Kamerabildes
- 3) Einnahme der Andruck- und Greifkraft durch den Probanden
- 4) Beginn der Messung und des Bohrvorganges
- 5) Ende der Messung nach ca. 5 cm Bohrstrecke (ungefähr 8 s)

Wie in Abschnitt 5.3.4 bereits diskutiert, ist es notwendig, dass der Einfluss der Anwendung, der Umwelt und des Power-Tools auf den Beschleunigungseffektivwert in den Versuchsreihen (Serie von Versuchen gleicher Versuchseinstellung) möglichst

konstant gehalten wird. Da der Akku, das Untergrundmaterial sowie der Bohrer zwischen den Versuchsreihen getauscht werden müssen und gleichbleibende Umweltbedingungen nur im Rahmen der normalen Laborbedingungen vorliegen, ist eine Bewertung der veränderten Versuchsbedingungen auf den Beschleunigungseffektivwert des Power-Tools notwendig. Hierfür wird nach jeder Versuchsreihe, welche sich aus mindestens 10 Einzelversuchen gleicher Versuchsparameter zusammensetzt, ein definierter Referenzversuch durchgeführt, um Veränderungen der Power-Tool-Vibration durch die Anwendung aber auch Power-Tool-interne Veränderungen (beispielsweise Erwärmung des Power-Tools) erkennen zu können. Dieser Referenzversuch wird hierbei von Proband 2, in der Haltung 1 mit einer Andruckkraft von 100 N und einer Greifkraft von 40 N durchgeführt.

5.4.2 Einfluss des Power-Tools, der Umwelt und der Anwendung auf den Beschleunigungseffektivwert des Bohrhammers

Um den reinen Einfluss der Stein- und Bohrerkombinationen auf den Beschleunigungseffektivwert zu untersuchen, wurden die Referenzversuche einzeln ausgewertet. In Bild 5-9 ist der gemessene Effektivwert der Beschleunigung bei der Bohrhammer-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} für verschiedene Kombinationen zwischen Untergrund und Bohrer dargestellt. Die Versuche sind hierbei bei unterschiedlichen Akkuladezuständen (max. 20 Bohrungen bei vollgeladenem Akku) durchgeführt worden, was Einfluss auf die Schlagleistung und somit die Vibration nehmen könnte. Die Versuchsparameter entsprechen hierbei denen des definierten Referenzversuches.

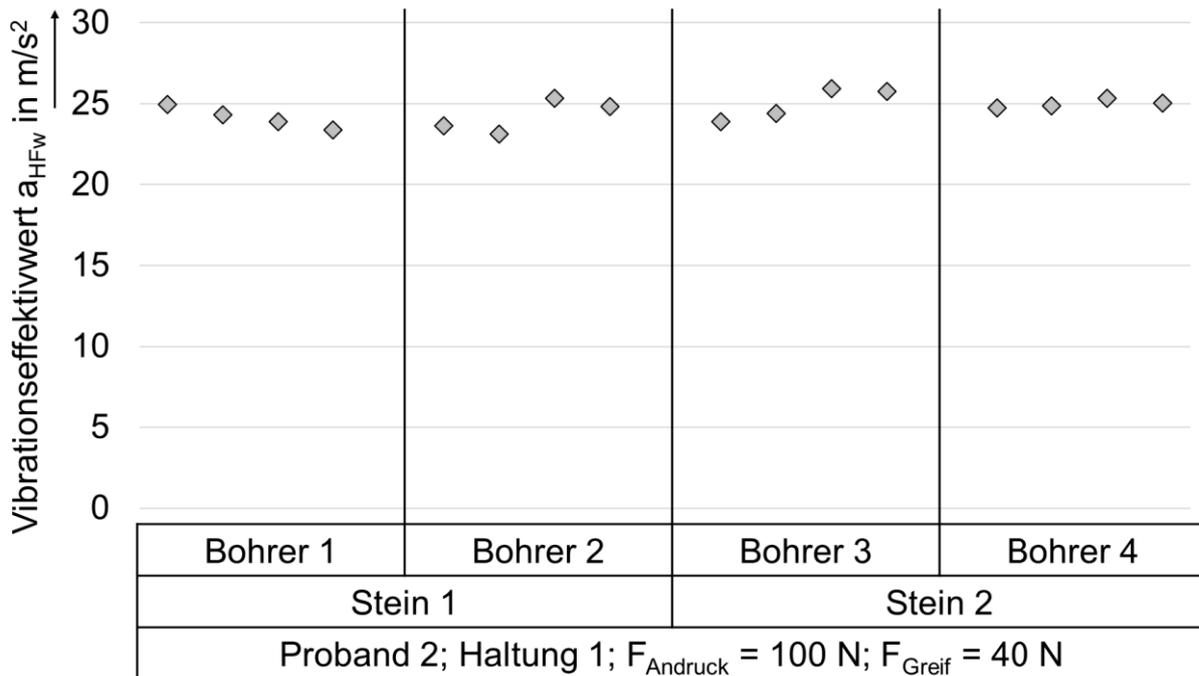


Bild 5-9: Datenpunkte des Effektivwertes der frequenzbewerteten Beschleunigung a_{HFw} für verschiedene Kombinationen aus Untergrund und Bohrer

Der Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} zeigt sich in den durchgeführten Versuchen nicht sensitiv gegenüber der Akkuladung und der Kombination des verwendeten Steines und Bohrers (vgl. Bild 5-9). Die versuchsreiheninternen¹⁶⁶ Abweichungen sind größer als der Effekt verschiedener Ladezustände oder Stein- / Bohrer-Kombinationen. Da die Versuche nach unterschiedlichen Abkühlungszeiten des Power-Tools und zu unterschiedlichen Tageszeiten durchgeführt wurden, ist auch von keinem Einfluss der Power-Tool-Temperatur oder der Umwelt auszugehen. Es kann somit festgestellt werden, dass zu Beginn einer jeden Versuchsreihe von einer gleichen Beeinflussung des Beschleunigungseffektivwerts durch Power-Tool-interne Parameter und Anwendungsinteraktionen ausgegangen werden kann. Abweichungen des gemessenen Beschleunigungseffektivwerts entspringen somit den veränderten passiven Anwendereigenschaften, wenn sie größer sind als die versuchsreiheninternen Abweichungen des Beschleunigungseffektivwerts. Eine Randomisierung des Versuchsplanes ist somit nicht notwendig.

¹⁶⁶ Versuchsreihe = Serie von Versuchen gleicher Versuchseinstellung

5.4.3 Ergebnisse und Diskussion

5.4.3.1 Darstellung der Ergebnisse zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf den Effektivwert der Beschleunigung des Bohrhammers

Den folgenden Auswertungen liegt eine gemeinsame Datenbasis zu Grunde. Diese Datenbasis ist zur vergleichenden Bewertung der einzelnen Parameter jeweils in einer abgeänderten Reihenfolge der Versuchsreihen, wie in Bild 5-10 prinzipiell visualisiert, dargestellt. Die jeweils in einer Diagrammsektion dargestellten Daten (vgl. Bild 5-10 senkrechte Linie) basieren auf zwei Versuchsreihen, die sich nur durch einen Versuchsparameter unterscheiden. In einer Sektion dieser Diagramme sind jeweils zwei Versuchsreihen dargestellt, die direkt vergleichbar sind und sich nur durch Variation einer Faktorstufe unterscheiden.

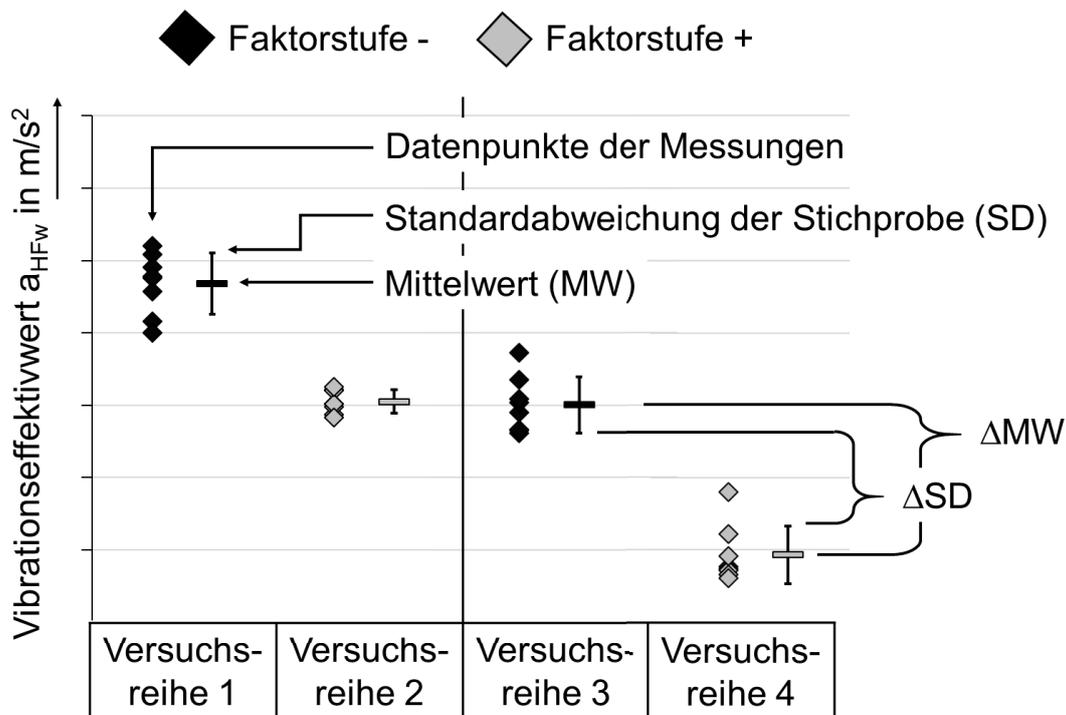


Bild 5-10: Darstellungsprinzip der Ergebnisse zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf die Beschleunigungseffektivwerte am Bohrhammer

Die gemessenen Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFW} sind jeweils als rautenförmige Datenpunkte dargestellt. Zur Auswertung werden jeweils 8 Einzelversuche der mindestens 10 Einzelversuche einer Versuchsreihe herangezogen. Als Auswahlkriterium wird die Minimierung der Abweichung zwischen Soll- und Ist-Kräften (Summe der Abweichung zwischen Andruck- und Greifkraft) gewählt. Die maximale mittlere Abweichung von Ist- und Sollkraft beträgt für die Andruck- und Greifkraft ca. 10 N. Der arithmetische Mittelwert (MW) der 8 Einzelversuche ist für jede Versuchsreihe als Balkenmarkierung

dargestellt. Die sich ergebende Standardabweichung der Stichprobe (SD) ist jeweils positiv und negativ, über bzw. unter der Balkenmarkierung als Whisker (schwarze Linien über und unter dem Balken) dargestellt. Der Betragsabstand zweier Versuchsreihen-Mittelwerte, welche sich nur durch einen Versuchsparameter unterscheiden, wird mit ΔMW bezeichnet. Der Betrag spiegelt die Einflussstärke eines Versuchsparameters wider. Da im Rahmen dieser Arbeit eine relativ kleine Stichprobe analysiert wird, wird ein sicherer Einfluss erst angenommen, wenn sich untere und obere Standardabweichung zweier Versuchsreihen nicht überschneiden. Diese Werte entsprechen einem Cohens d Index von >1 und sind als großer Effekt anzusehen. Auf die Angabe des Cohens d Index wird an dieser Stelle jedoch verzichtet, da in folgenden Versuchen am Impulsschrauber der Wert nicht mehr eindeutig anhand der vorhandenen Theorien definierbar ist. Stattdessen wird der Betragsabstand zwischen beiden Standardabweichungen angegeben, der mit ΔSD bezeichnet ist. Je näher dieser Betrag an ΔMW liegt, desto sicherer kann von einem Einfluss ausgegangen werden. Dieses Vorgehen entspricht im Wesentlichen den Grundlagen des Cohens d Indexes.

5.4.3.2 Eignung des Beschleunigungseffektivwertes a_{HFw} zur Quantifizierung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften am Bohrhammer

In Bild 5-11 sind die Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Bohrhammers bei Variation von Haltung, Andruckkraft, Proband und Greifkraft für einen Auszug aller Versuche dargestellt.

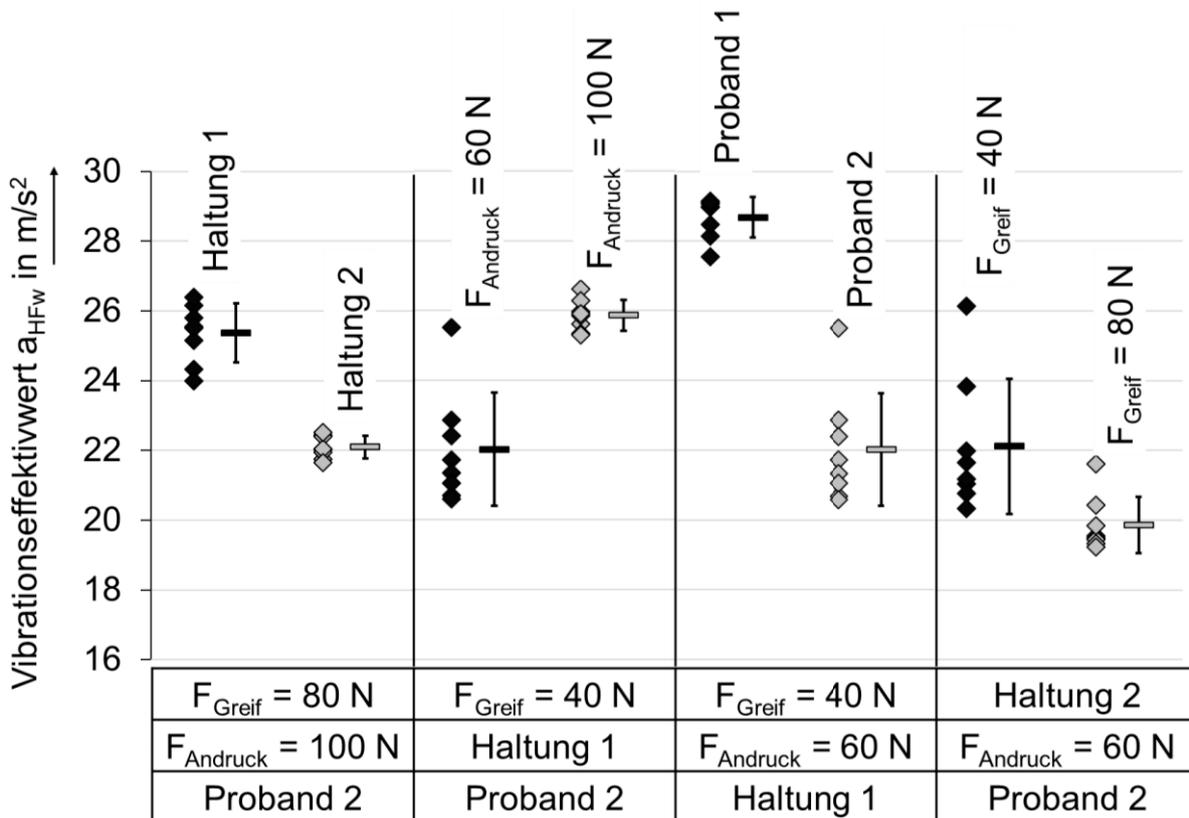


Bild 5-11: a_{HFw} -Wert des Bohrhammers bei Variation von Haltung, Andruckkraft, Proband und Greifkraft

In einer Sektion des Diagrammes sind jeweils zwei Versuchsreihen dargestellt, die direkt vergleichbar sind und sich nur durch Variation einer Faktorstufe unterscheiden. Die Variationen der drei Einflussparameter Haltung, Andruckkraft und Proband führen bei den hier dargestellten Versuchsreihen dazu, dass ΔMW groß ist und die Standardabweichungen sich nicht überschneiden. Im Falle der Greifkraftvariation ist ebenfalls eine deutliche Auswirkung auf den Mittelwert des Effektivwertes a_{HFw} zu beobachten, jedoch überschneiden sich die Standardabweichungen leicht.

Im Ergebnis zeigt sich, dass der Effektivwert a_{HFw} messbar sensitiv gegenüber Variation der Andruckkraft, der Haltung und Variation des Probanden ist.

5.4.3.3 Einfluss der Haltung auf den Beschleunigungseffektivwert des Bohrhammers

In Bild 5-12 sind die Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Bohrhammers für Proband 2 bei den beiden untersuchten Haltungen dargestellt.

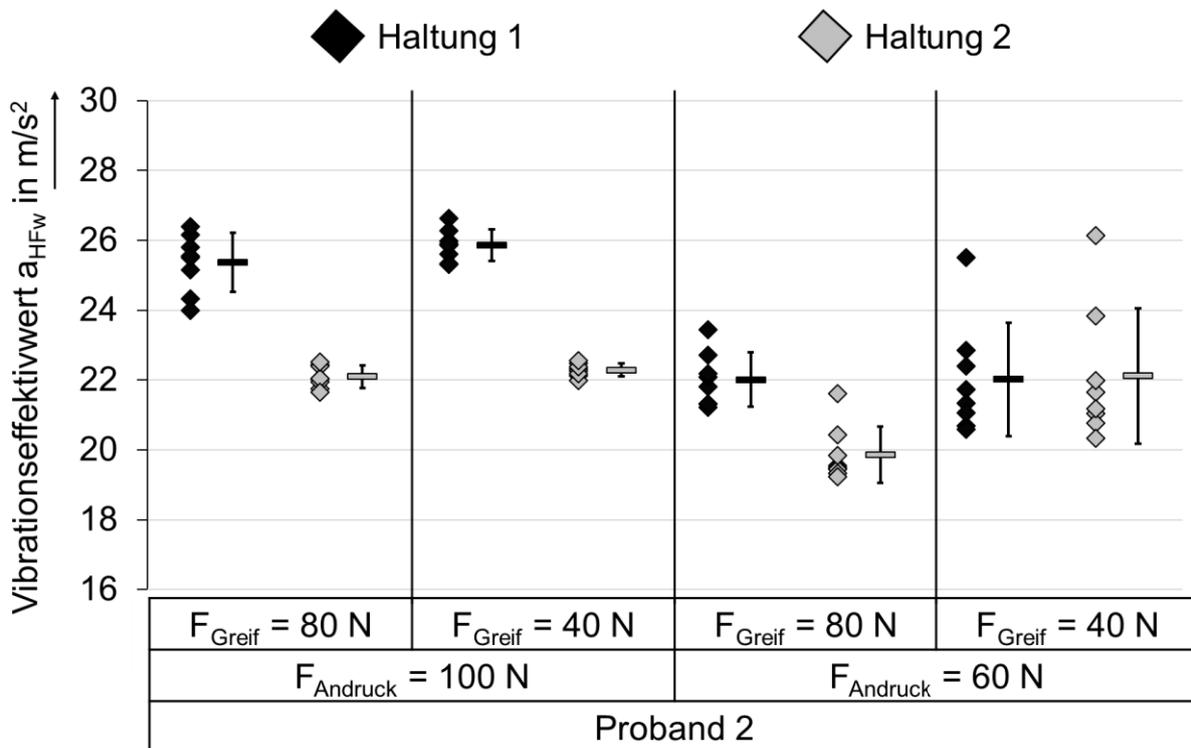


Bild 5-12: a_{HFw} -Wert des Bohrhammers bei Variation der Haltung des Probanden

Für die Andruckkraft von 100 N zeigt sich eine große haltungsbedingte Änderung des a_{HFw} – Wertes beim Übergang von Haltung 1 zu Haltung 2 (bis zu ΔMW : $3,6 m/s^2$ bei ΔSD : $2,9 m/s^2$). Der Haltungseinfluss auf den Effektivwert der Beschleunigung und somit auf das Bewegungsverhalten des Bohrhammers ist hierbei nahezu unabhängig von der Greifkraft. Der Einfluss der Haltung auf die Effektivwerte der Beschleunigung weist bei reduzierter Andruckkraft von 60 N und großer Greifkraft im Vergleich zu großer Andruckkraft leicht erniedrigte aber dennoch deutliche Auswirkungen auf (ΔMW : $2,2 m/s^2$ bei ΔSD : $0,6 m/s^2$). Bei gleichzeitiger Reduktion der Greifkraft auf 40 N erhöht sich die Streuung der gemessenen Effektivwerte deutlich. Hierbei ist kein Einfluss der Haltung erkennbar.

Aus den Daten kann geschlossen werden, dass der Einfluss der Haltung mit der Reduzierung der Ankopplung des Anwenders an den Griff (Kombination aus Greif- und Andruckkraft) bei den untersuchten beiden Faktorstufen sinkt. Das Ergebnis scheint plausibel, da das Hand-Arm System weniger stark angekoppelt ist und somit kaum Einfluss zeigen kann. Weiter lässt sich feststellen, dass die durch die hier untersuchte

Haltung veränderten passiven Anwendereigenschaften einen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Power-Tools ausüben und gemäß den Grundannahmen aus Abschnitt 5.1 somit die Beanspruchung auf den Bohrhammer verändern können.

5.4.3.4 Einfluss der Andruckkraft auf den Beschleunigungseffektivwert des Bohrhammers

Die Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Bohrhammers bei den untersuchten Andruckkräften ist in Bild 5-13 für Proband 2 dargestellt.

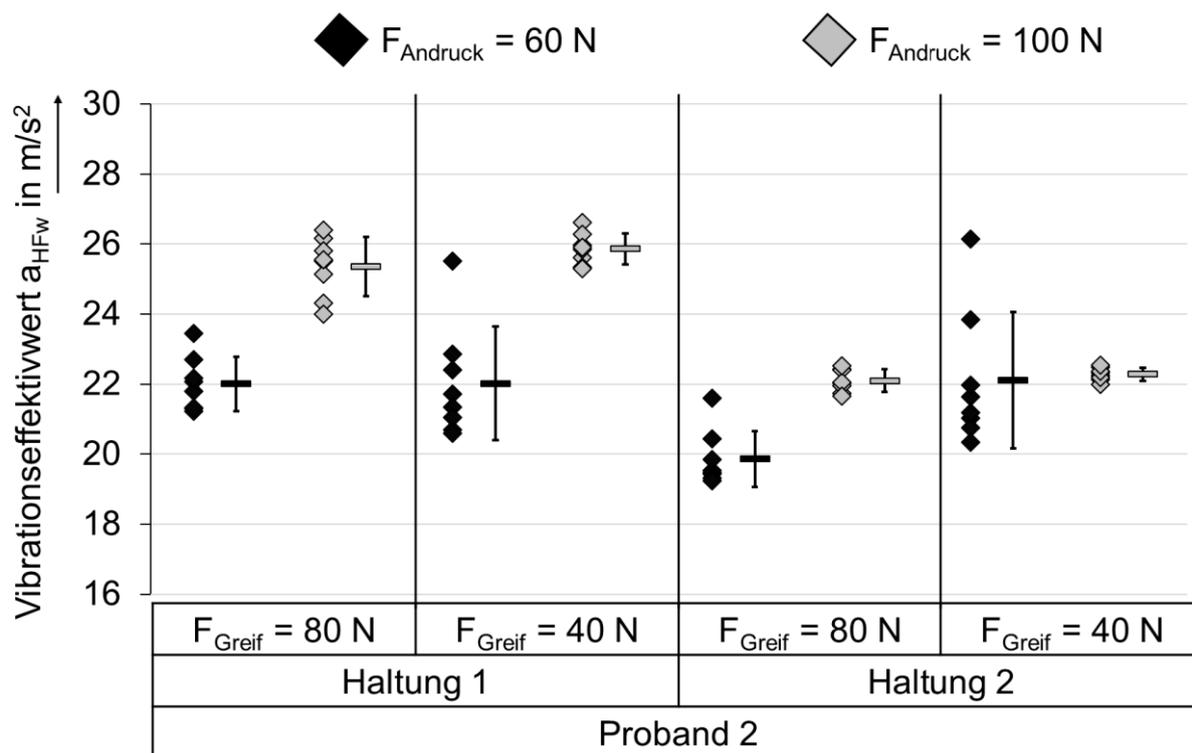


Bild 5-13: a_{HFw} -Wert des Bohrhammers bei Variation der Andruckkraft des Probanden

Bei einer Erhöhung der Andruckkraft erhöht sich bei drei von vier der untersuchten Parameterkombinationen die Vibration des Bohrhammers. Die maximale Auswirkung der Andruckkraftänderung von 100 N auf 60 N auf den a_{HFw} -Mittelwert ergibt sich bei Haltung 1 und einer Greifkraft von 40 N (ΔMW : 3,8 m/s^2 bei ΔSD : 1,8 m/s^2). Auch bei hoher Greifkraft ist dieser Einfluss in Haltung 1 nahezu unvermindert. In Haltung 2 reduziert sich der andruckkraftbedingte Einfluss auf die Beschleunigungseffektivwerte gegenüber der untersuchten Haltung 1 deutlich. Während bei einer Greifkraft von 80 N noch ein starker Einfluss der veränderten Andruckkraft auf den Effektivwert bleibt (ΔMW : 2,2 m/s^2 bei ΔSD : 1,1 m/s^2), ergibt sich bei niedriger Greifkraft keine messbare Änderung des Beschleunigungseffektivwerts.

Über die gesamten Messwerte gesehen ergibt sich in drei von vier Fällen eine nachweisbare Erhöhung des Beschleunigungseffektivwertes bei Erhöhung der

Andruckkraft. Inwiefern dieser Effekt aus der Veränderung der passiven Anwendereigenschaften resultiert, kann jedoch nicht geschlossen werden, da die Erhöhung der Andruckkraft ebenfalls die anwendungsseitigen Wechselwirkungen zwischen Bohrer und Untergrund beeinflussen und hiermit zu einer Veränderung der Beschleunigungseffektivwerte führen kann. Da die Andruckkraft aber, wenn somit auch nur indirekt, das Bewegungsverhalten des Bohrhammers bei der Hauptfrequenz beeinflussen kann, kann sie nach den in Abschnitt 5.1 formulierten Grundannahmen die Beanspruchung auf das Power-Tool verändern.

5.4.3.5 Einfluss der Greifkraft auf den Beschleunigungseffektivwert des Bohrhammers

In Bild 5-14 sind die Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Bohrhammers für Proband 2 bei den untersuchten Greifkräften dargestellt.

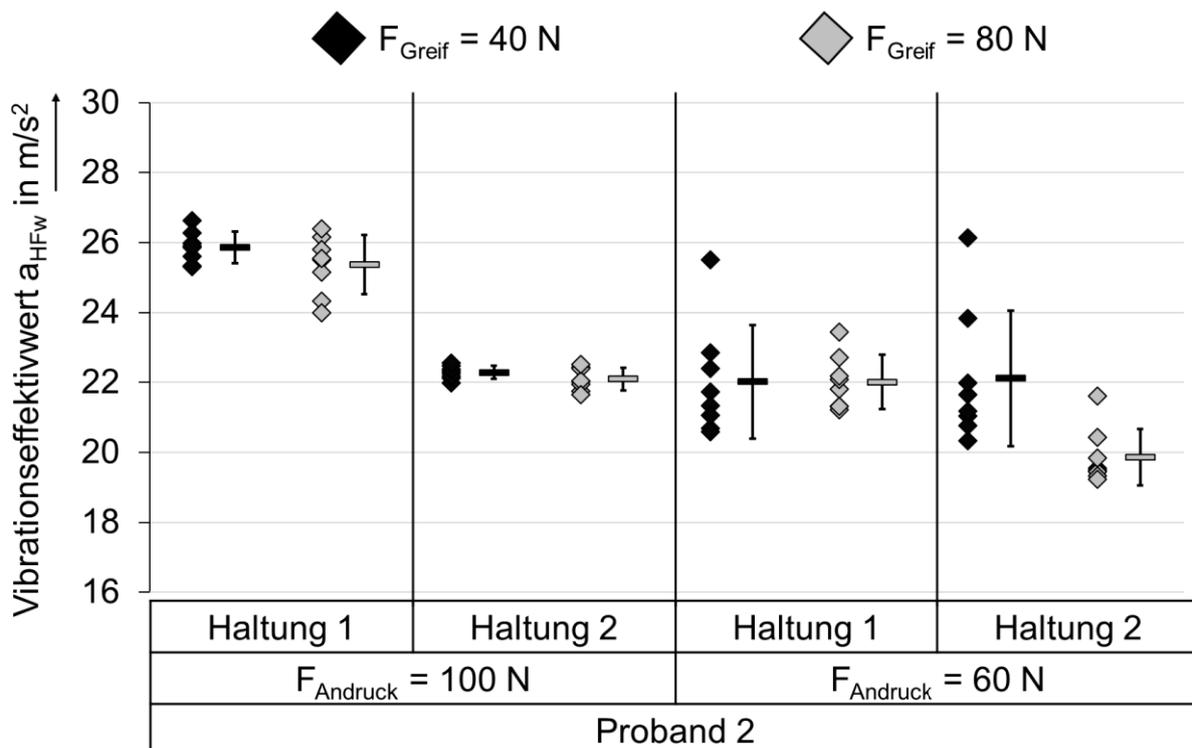


Bild 5-14: a_{HFw} -Wert des Bohrhammers bei Variation der Greifkraft des Probanden

Die untersuchten Greifkräfte haben keinen direkten Einfluss auf die Effektivwerte der Beschleunigung und somit auf das Bewegungsverhalten des Bohrhammers. Der Beschleunigungseffektivwert zeigt sich nicht sensitiv gegenüber der veränderten Greifkraft. Wie jedoch bereits in Abschnitt 5.4.3.3 festgestellt, beeinflusst die Greifkraft aber indirekt im Zusammenwirken mit der Haltung die Beschleunigungseffektivwerte. So kann in Bild 5-12 vergleichend bei Änderung von Haltung 1 auf Haltung 2 im Falle der 60 N Andruckkraft beobachtet werden, dass die Haltung bei niedriger Greifkraft

keinen Einfluss hat, während bei hoher Greifkraft ein Einfluss messbar ist. Aus den Daten kann geschlossen werden, dass der Einfluss der Haltung mit der Reduzierung der Ankopplung des Anwenders an den Griff (bei den beiden untersuchten Kombinationen aus Greif und Andruckkraft) sinkt. Es kann somit festgestellt werden, dass die durch die Greifkraft veränderten passiven Anwendereigenschaften zumindest einen indirekten Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Power-Tools ausüben und dass gemäß den Grundannahmen aus Abschnitt 5.1 die Greifkraft somit die Beanspruchung des Bohrhammers verändern kann.

5.4.3.6 Einfluss des Probanden auf den Beschleunigungseffektivwert des Bohrhammers

Die Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Bohrhammers für die beiden Probanden ist in Bild 5-15 für die Greifkraft von 40 N dargestellt.

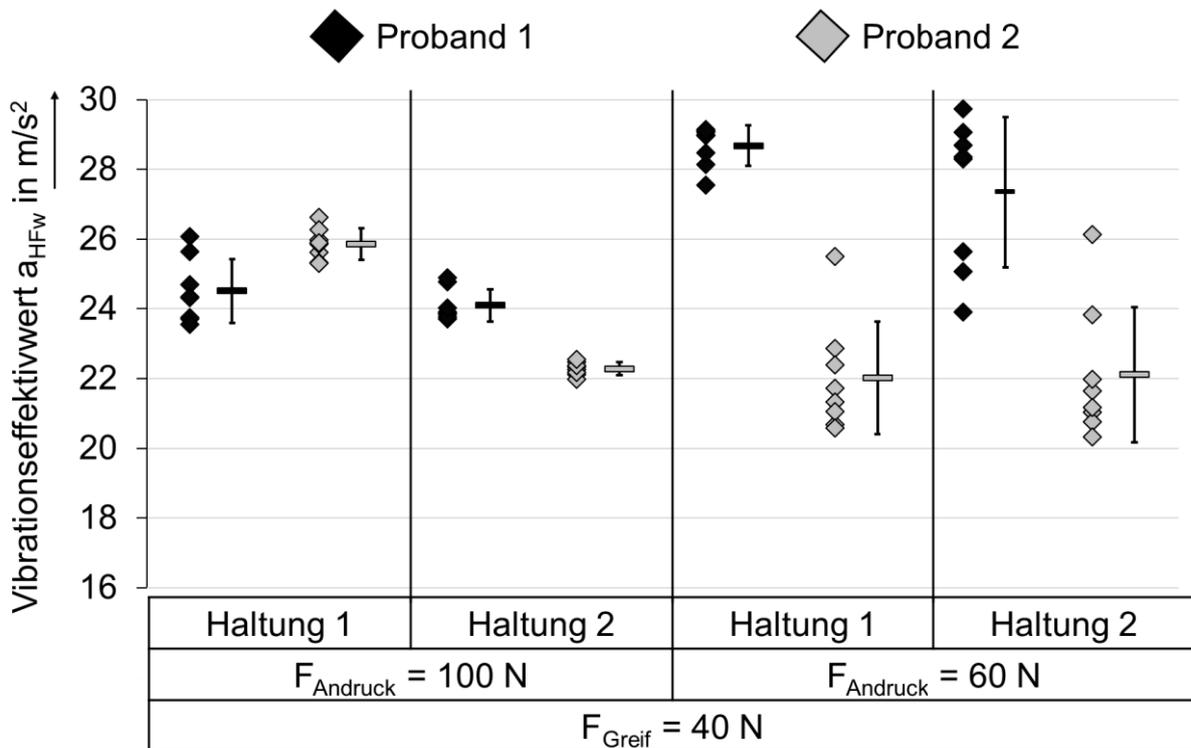


Bild 5-15: a_{HFw} -Wert des Bohrhammers bei Variation des Probanden

Die Variation des Probanden hat in allen untersuchten Parameterkonfigurationen einen deutlich messbaren Einfluss. Bei untersuchter geringer Andruckkraft ist dieser Einfluss größer (bis zu $\Delta MW: 6,7\text{ m/s}^2$ bei $\Delta SD: 4,5\text{ m/s}^2$) als bei hoher Andruckkraft (bis zu $\Delta MW: 1,81\text{ m/s}^2$ bei $\Delta SD: 1,2\text{ m/s}^2$). Die Auswirkungen der Probandenvariation stellt sich in Haltung 2 bei 60 N Andruckkraft fast unverändert zu Haltung 1 dar. Bei Erhöhung der Andruckkraft von 60 N auf 100 N ergibt sich ein stark verringerter Einfluss der Probandenvariation auf den Beschleunigungseffektivwert. Die

Veränderung des Beschleunigungseffektivwertes bei hoher Andruckkraft ist bei Haltung 1 gegenläufig zu Haltung 2. Während der Probandenwechsel in Haltung 1 einen Anstieg des a_{HFW} -Mittelwertes bewirkt, fällt der a_{HFW} -Mittelwert in Haltung 2. Auffällig ist hierbei, dass bei Proband 2 im Falle der 100 N Andruckkraft und 40 N Greifkraft ein hoher Einfluss der Haltung auf den a_{HFW} -Mittelwert festgestellt werden kann, während dies bei Proband 1 nicht feststellbar ist.

In Summe lässt sich feststellen, dass die zwei untersuchten Probanden einen starken Einfluss auf den Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFW} haben. Unter Berücksichtigung der Grundannahmen aus Abschnitt 5.1 lässt sich feststellen, dass der Proband einen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Bohrhammers hat und somit die Beanspruchung des Bohrhammers verändern kann.

5.5 Zwischenfazit zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Bohrhammers

Das Bewegungsverhalten des Bohrhammers lässt sich durch Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFW} in einer skalaren Größe ausdrücken. Dieser Effektivwert spiegelt das dominierende Bewegungsverhalten wider. Unter Berücksichtigung der Grundannahmen kann in Bezug zur ersten Teilforschungsfrage der Forschungsfrage 1 festgestellt werden:

Forschungsfrage 1: Einfluss der passiven Anwendereigenschaften

Wie kann der Einfluss auf ein Power-Tool quantifiziert werden?

Der Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFW} zeigt sich sensitiv gegenüber der Haltungs-, Andruckkraft- und Probandenvariation. Da sich durch diese Faktoren die passiven Anwendereigenschaften beeinflussen lassen, kann der Effektivwert somit für eine Quantifizierung des passiven Anwendereinflusses auf das Bewegungsverhalten des Bohrhammers genutzt werden. Unter Einbezug der Grundannahmen aus Abschnitt 5.1 ist der Effektivwert geeignet, um den Einfluss veränderter passiver Anwendereigenschaften auf den Bohrhammer in manuellen Tests während der Hauptfunktionserfüllung zu erforschen und um abzuleiten, ob diese zu einer veränderten Beanspruchung führen können.

Unter Nutzung der in Abschnitt 5.3 entwickelten Versuchsmethode lässt sich die Greif- und Andruckkraft durch den Anwender bei der Bedienung des Bohrhammers reproduzierbar realisieren. Das Anzeigesystem zur Anzeige der Ist- und Sollkräfte

erweist sich jedoch innerhalb der Versuche als noch nicht vollständig geeignet. Die Anwender haben trotz angezeigten numerischen Werten und Farbskala merkliche Probleme schnell genug zu erkennen, ob die eingenommene Kraft über oder unter dem Sollwert liegt. Zudem führt die schnelle Auffrischungsrate der Anzeigen im vollen Versuchs-Setup zu Überkompensationen durch den ungeübten Anwender. Erst nach mehreren Versuchen stellt sich ein Trainingseffekt des Anwenders auf die Skalen ein und Überkompensationen bleiben aus.

Die entwickelte Methode zur Einnahme der Haltung erweist sich als geeignet. Alleine die Markierung der Fußposition und Vorgabe der Bohrungshöhe führt zu sehr reproduzierbaren Haltungen der Probanden. Ein Vergleich der Kamerabilder aus immer gleicher Position vor einer segmentierten Stellwand bringt hierbei nur geringen Vorteil, steigert jedoch die Nachvollziehbarkeit im Nachgang der Versuche.

Der Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} zeigt sich sensitiv gegenüber der Haltung sowie der Andruckkraft des Probanden. Als Schlussfolgerung muss in den Versuchen auch die Streubreite abhängig von diesen Parametern sein. Die Streubreite der Effektivwerte in den Versuchen ist jedoch weitestgehend unabhängig gegenüber der Variation des Probanden (vgl. SD in Bild 5-15). Es lässt sich somit schließen, dass bei unterschiedlichen Probanden sowohl die Haltung als auch die Andruckkraft in vergleichbarem Maße konstant gehalten wird. Da die Greifkraft keinen großen Einfluss auf die Streubreite der Effektivwerte hat, werden die mittleren gemessenen Greifkräfte als Referenzgröße zur Beurteilung der Methode herangezogen. Die Abweichung der mittleren gemessenen Greifkraft von der Vorgabe ist in den ausgewerteten Versuchen kleiner als 10%.

Zusammenfassend ist es innerhalb dieser Arbeit gelungen, eine komplette Methode bereitzustellen mit der die aus dem Stand der Forschung bekannten Einflüsse auf die mechanisch-dynamischen Anwendereigenschaften bei einer Untersuchung an einem Bohrhammer eingestellt werden können. Es wurde aufgezeigt, dass mit Hilfe dieser Methode Andruck- und Greifkraft sowie die Haltung des Probanden in zum hier durchgeführten Untersuchung erforderlichen Rahmen reproduzierbar eingenommen werden kann.

Bezugnehmend auf die zweite Unterfrage der ersten Forschungsfrage aus Abschnitt 4.2 lässt sich hiermit folgendes feststellen:

Forschungsfrage 1: Einfluss der passiven Anwendereigenschaften

Mit welchen Mitteln lassen sich die aus dem Stand der Forschung bekannten Einflüsse auf die mechanisch-dynamischen Anwendereigenschaften bei einer Untersuchung einstellen?

Eine Einstellung der zu untersuchenden Einflüsse auf die mechanisch-dynamischen Anwendereigenschaften ist durch die in Abschnitt 5.3 vorgestellten Methoden am Bohrhammer möglich. Die Methode der Anzeige der Anwenderkräfte sollte jedoch überarbeitet werden.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode ermöglichte erstmals die Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften, welche sich durch Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders verändern lassen, auf das Bewegungsverhalten eines Bohrhammers. Es konnten hieraus wichtige erste Erkenntnisse zum Einfluss der einzelnen Parameter auf die Beanspruchung des Bohrhammers in einer exemplarischen Studie gewonnen werden.

Unter der Annahme, dass sich durch den Probanden bei gleicher Greifkraft, Andruckkraft und Haltung nur die anthropometrischen Charakteristiken bzw. die Konstitution des Anwenders auf die passiven Anwendereigenschaften auswirken, lässt sich der Einfluss der anthropometrischen Charakteristiken bzw. der Konstitution durch die Variation des Probanden untersuchen. Innerhalb der Versuche zeigt sich eine Abhängigkeit des Effektivwertes der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} am Bohrhammer von den vier Parametern Andruck- und Greifkraft, Haltung und Proband. Im Falle der Haltung, der anthropometrischen Charakteristiken bzw. der Konstitution und der Greifkraft kann aus den Versuchen geschlossen werden, dass den gemessenen Auswirkungen auf den Effektivwert eine Veränderung der passiven Anwendereigenschaften zu Grunde liegt. Für die Andruckkraft ist dies auf Grund der veränderten Wechselwirkungen zwischen Bohrer und Untergrund nicht eindeutig möglich.

Mit den in Abschnitt 5.1 formulierten Grundannahmen lässt sich die erste Forschungsfrage aus Abschnitt 4.2 somit für den Bohrhammer zusammenfassend wie folgt beantworten:

Forschungsfrage 1: Einfluss der passiven Anwendereigenschaften

Haben die passiven Anwendereigenschaften, welche sich durch Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders verändern, einen Einfluss auf einen untersuchten Bohrhammer und Impulsschrauber in manuellen Tests während der Hauptfunktionserfüllung und können diese zu veränderten Beanspruchungen führen?

Die variierenden passiven Anwendereigenschaften, welche sich durch Greifkraft, Haltung und Proband (bzw. dessen anthropometrischen Charakteristiken bzw. Konstitution) verändern lassen, haben einen Einfluss auf das grundlegende Bewegungsverhalten des Bohrhammers in manuellen Tests während der Hauptfunktionserfüllung. Sie können deshalb die Beanspruchung des Bohrhammers verändern. Die Andruckkraft beeinflusst eventuell zwar nicht die passiven Anwendereigenschaften, aber ebenfalls das grundlegende Bewegungsverhalten des Bohrhammers und sollte in gleichem Maße wie die anderen Parametern berücksichtigt werden.

Die entwickelte Methode wird im folgenden Abschnitt auf einen Impulsschrauber übertragen und weiterentwickelt.

5.6 Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Impulsschraubers (Methodenentwicklungsphase)

Als zweites Beispielsystem zur Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften auf Power-Tools während manuellen Tests wird der Impulsschrauber DTS 131 von Makita (Bild 5-16) gewählt. Mit diesem Schrauber werden üblicherweise Schrauben zwischen M5 und M8 mit einem maximalen Drehmoment von 40 Nm in Einhandbedienung angezogen¹⁶⁷. Im Gegensatz zum Bohrhammer, welcher besonders in der zur Unterarmachse parallelen Richtung mit

¹⁶⁷ vgl. Makita Werkzeuge GmbH 2016

dem Anwender wechselwirkt, interagieren Schrauber in Rotationsrichtung zur Unterarmachse. Die Methode zur Kontrolle der aktiven Anwenderinteraktionen am Beispiel eines Impulsschraubers wurde in Zusammenarbeit mit HÜCKSTÄDT¹⁶⁸ und HÖLL¹⁶⁹ entwickelt und ebenfalls in MATTHIESEN ET AL.¹⁷⁰ publiziert. Die Ergebnisse werden hier im direkten Kontext zu dieser Arbeit aufbereitet vorgestellt.

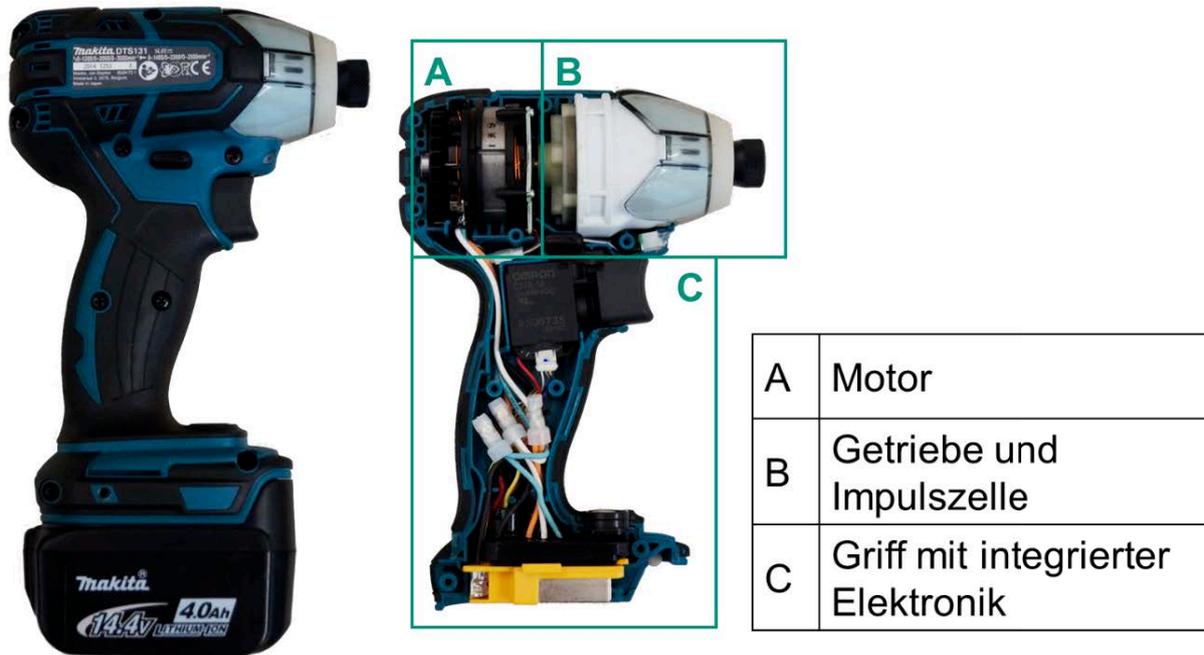


Bild 5-16: Verwendeter Impulsschrauber Makita DTS 131 geschlossen und geöffnet¹⁷¹

Zur Untersuchung des Einflusses der passiven Anwenderinteraktionen auf die Power-Tool-Bewegung müssen die aktiven Anwenderinteraktionen konstant gehalten werden. Im Falle eines Impulsschraubers betrifft dies vor allem die Greifkraft des Anwenders am Griff. Die Andruckkraft, die der Anwender in Richtung der Schraubachse aufbringt, stellt keine eigentliche Bedienkraft dar, die zur Funktion des Power-Tools notwendig ist. Sie wird jedoch benötigt, um den Schrauber der Schraube nachzuführen und zu positionieren. In Vorstudien konnte durch die Probanden beobachtet werden, dass diese Kraft subjektiv bewertet nur schwierig konstant gehalten werden kann. Weiter ist nach dem Stand der Forschung davon auszugehen, dass auch diese Kraft zu einer Veränderung der passiven Anwenderinteraktionen führen kann. Es ergibt sich somit wie beim Bohrhammer die Aufgabe, die Andruck- und Greifkraft während des Betriebes kontinuierlich messen zu können und dem Probanden als Feedback zu visualisieren. Weiterhin soll, wie im Falle des

¹⁶⁸ vgl. Hückstädt 2015 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

¹⁶⁹ vgl. Höll 2016 (vom Autor co-betreute Bachelorarbeit)

¹⁷⁰ vgl. Matthiesen et al. 2018c

¹⁷¹ Hückstädt 2015 (vom Autor co-betreute Masterarbeit), S. 50 (modifizierte Abbildung)

Bohrhammers, der Einfluss der Armhaltung untersucht werden, weswegen diese während der Versuche kontrollierbar sein muss.

5.6.1 Messgriff zur Aufnahme der Andruck- und Greifkraft sowie der Power-Tool-Vibration

Bild 5-16 zeigt das verwendete Beispielsystem mit geschlossenem bzw. geöffnetem Gehäuse. Um eine Messung der Andruckkraft im Schrauber durch ein am Markt verfügbares Sensorelement zu ermöglichen, muss der Kraftfluss zwischen Hand und Power-Tool-Abtrieb aufgetrennt werden. Der Antriebstrang des Schraubers selbst soll möglichst unverändert bleiben. Eine Messung der Andruckkraft am Antriebsstrang oder dessen Lagerstellen wäre zudem durch die hohe Zahl an Wirkflächenpaaren zum Gehäuse nur schwierig zu realisieren. Es bietet sich somit eine Trennung zwischen Gehäuseteil, welches Motor (A) sowie Getriebe mit Impulseinheit (B – folgend nur als Impulseinheit bezeichnet) aufnimmt, und dem Griff-Gehäuseteil (C) an. Wie zu erkennen ist, steht im Gehäuse des Impulsschraubers nur wenig Bauraum für eine solche Modifikation zur Verfügung. Um dennoch die Form des Griffes und somit die Haptik des Power-Tools zu erhalten, wurde ein neues Gehäuse, das Motor (A), Impulseinheit (B) sowie Messtechnik für Andruck- und Greifkraft aufnimmt, gestaltet.

Bild 5-17 zeigt eine schematische Darstellung des modifizierten Impulsschraubers zur Messung der Andruck- und Greifkraft.

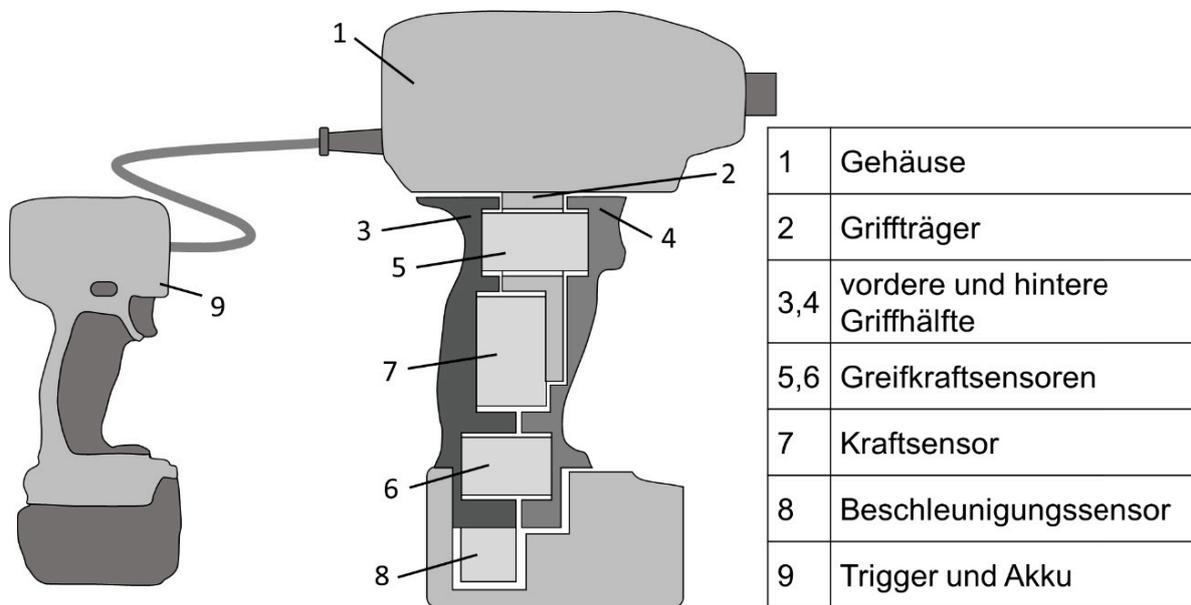


Bild 5-17: Schematische Darstellung des modifizierten Impulsschraubers zur Messung der Andruck- und Greifkraft¹⁷²

¹⁷² Matthiesen et al. 2018c, S. 162 (modifizierte Abbildung)

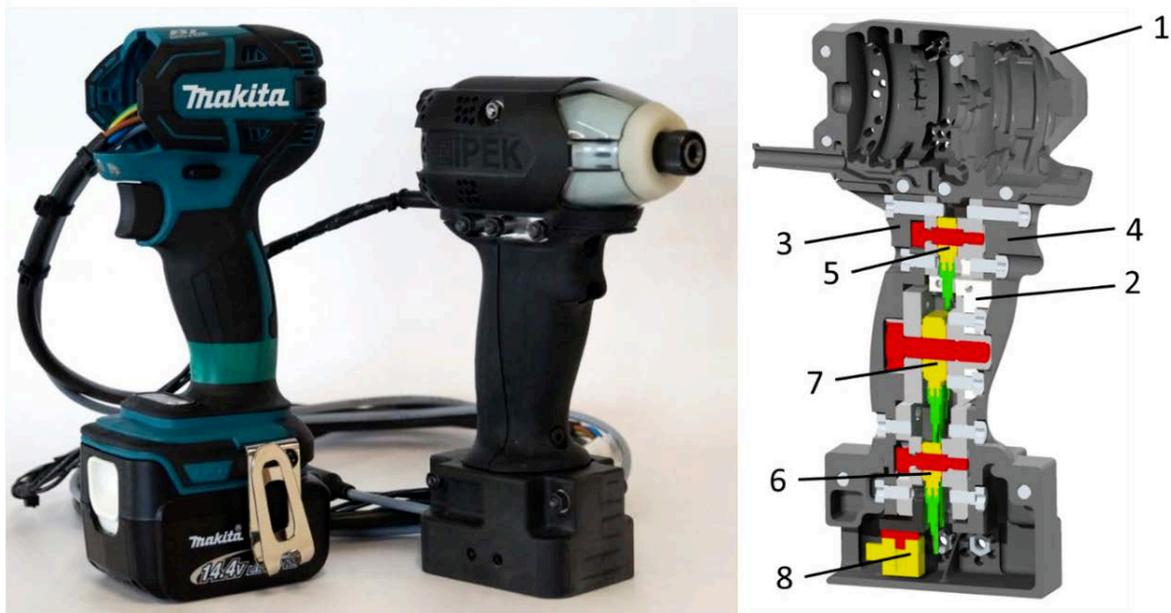
Die bestehende Elektronik inklusive Trigger und Akku (C in Bild 5-16) ist in einen zusätzlichen Griff (9) integriert, so dass die Drehzahlregelung des Power-Tools mit der freien Hand ermöglicht wird. Um den Motor (A) und die Impulseinheit (B) ähnlich zum Original-Power-Tool zu fassen, wurden die Wirkflächenpaare zwischen den Komponenten und dem ursprünglichen Gehäuse analysiert und deren relative Lage und Form durch einen 3D-Scan des Gehäuses in eine neue Gehäusekonstruktion übernommen. Das Teilgehäuse (1), welches Motor und Impulseinheit (A und B) aufnimmt, ist aus PA6-GF30 gefertigt und bietet eine Schraubklemmverbindung zum Griffträger (2) aus Aluminium. Die Griff-Außenkontur des verwendeten Impulsschraubers wurde ebenfalls durch einen 3D-Scan erfasst und in eine neue Griff-Gehäusekonstruktion übernommen. Dieses neue Griff-Gehäuse besteht aus einer hinteren Griffschale (3) und einer vorderen Griffschale (4) und ist ebenfalls aus PA6-GF30 gefertigt. Um genügend Bauraum für die Sensorik zu ermöglichen, ist der Griff um 2,5 mm gegenüber dem Original-Impulsschrauber aufgedickt. Durch die Aufspaltung des Griffes in diese beiden Hälften wird eine Erfassung der Greifkraft in Anlehnung an DIN EN ISO 10819:2013-12 als Kraft zwischen der hinteren Griffhälfte (3) und der vorderen Griffhälfte (4) ermöglicht.

Zur Messung der Andruckkraft ist ein Kraft-Sensorelement (7) mit dem Griffträger (2) und der hinteren Griffhälfte (3) mittels Schrauben verbunden. Um neben der Andruckkraft in späteren Versuchsreihen auch die entstehende dynamische Reaktionskraft infolge der Schrauberdrehbewegung zwischen Griff und Hand messen zu können, wird diese Verbindung durch ein Piezo-drei-Achs-Kraft-Sensorelement Kistler 9251A realisiert. Das Sensorelement ist hierbei auf die Hälfte des maximalen Messbereiches vorgespannt, um Kräfte sowohl in Querrichtung als auch in Zug- und Druckrichtung messen zu können. Die Signale werden durch den Ladungsverstärker Kistler 5073A411 verstärkt. Die Lage des Kraft-Sensorelementes in unmittelbarer Nähe zur krafteinleitenden Stelle (ungefähr im Mittelpunkt der Hand) ermöglicht eine annähernd momentfreie Belastung des Sensorelementes, wie diese bei Piezo-Sensoren nötig ist.

Die Greifkraft wird in Anlehnung an den Vorschlag aus DIN EN ISO 10819:2013-12 durch zwei Piezo-ein-Achs-Kraft-Sensorelemente Kistler 9011A (5+6), welche die beiden Griffhälften (3+4) durch Verschraubungen verbinden, gemessen. Um eine sichere und spielfreie Verbindung der vorderen und hinteren Griffschale zu ermöglichen, sind die beiden Sensoren vorgespannt. Die Signale der Kraftsensoren werden ebenfalls durch den Ladungsverstärker Kistler 5073A411 verstärkt.

Der Effektivwert der Beschleunigung bei der Impulsschrauber-Hauptfrequenz soll, wie in Abschnitt 5.2 dargestellt, als Kenngröße für den Einfluss der variierenden passiven Anwendereigenschaften herangezogen werden. Nach EN ISO 5349-2:2001-12 ist zur

Messung der Vibration bei Schrauben ein Drei-Achs Beschleunigungssensor auf dem Pistolengriff des Power-Tools möglichst in der Mitte des Griffes zu platzieren. Da eine Messung innerhalb der Handfläche nicht möglich ist - da dort die Kraftsensoren integriert sind - ist der Beschleunigungssensor (8) möglichst dicht unterhalb des unteren Greifkraftsensors (8) angebracht. Der Sensor ist dabei nicht auf der Griff-Oberfläche, sondern im Inneren des Griffes implementiert. Als Beschleunigungssensor wird der drei-Achs Beschleunigungssensor PCB 356A02 verwendet, welcher mittels Mounting Plate direkt am unteren Greifkraftsensor (6) angebracht ist. Der Sensor wird über den Ladungsverstärker PCB 483C15 verstärkt.



1	Gehäuse	2	Griffträger	3,4	vordere und hintere Griffhälfte
5,6	Greifkraftsensoren	7	Kraftsensor	8	Beschleunigungssensor

Bild 5-18: Modifizierter Impulsschrauber zur Messung der Andruck- und Greifkraft und Schnitt durch das Gehäuse¹⁷³

5.6.2 Anzeige der Soll- und Istwerte der Andruck- bzw. Greifkraft für den Probanden

Um dem Probanden die Einnahme der geforderten Soll-Andruck- bzw. Greifkraft zu ermöglichen, müssen ihm die aktuell gemessenen Kräfte in Relation zu den Sollwerten dargestellt werden. Die am Bohrhammer entwickelte und im Abschnitt 5.3.2 vorgestellte Methode hat sich dabei in den durchgeführten Versuchen als noch nicht optimal erwiesen. Für den Probanden ist es eine Herausforderung die Anzeige schnell genug zu interpretieren. Die Farbskalierung, welche die numerisch dargestellten gemessenen Kräfte hinterlegt, bietet kaum Hilfe. Weiter wird in längeren Versuchen

¹⁷³ linkes Bild: Hückstädt 2015 (vom Autor co-betreute Masterarbeit), S. 97

die Auffrischungsrate von 0,25 bis 0,5 s, welche in DIN EN ISO 10819:2013-12 für die Anzeige von Andruck- und Greifkräften vorgeschlagen wird, als störend empfunden. Die Probanden neigen durch die Darstellung in Kombination mit der genutzten Auffrischungsrate bei den durchgeführten Versuchen zu einer Überkompensation der Abweichung zwischen Soll- und Ist-Kräften.

Innerhalb der Versuche zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschrauber wird aus den aufgeführten Gründen eine Darstellungsform verwendet, die einen grafischen Vergleich von Ist- und Sollwerten in Form einer analogen Anzeige ermöglicht. Um den Überkompensationen des Probanden entgegenzuwirken wird, im Gegensatz zur Methode am Bohrhammer, kein diskret variierender Mittelwert mit den vorgeschlagenen Auffrischungsraten genutzt, sondern ein gleitender Mittelwert aus den vorherigen 1000 Messpunkten. Die Auffrischungsrate lässt sich bei einem gleitenden Mittelwert nicht mehr sinnvoll angeben. Bei einer Abtastrate von 10 kHz werden immer die Messwerte der letzten 0,1 s in den gleitenden Mittelwert einbezogen. Das Anzeigesystem ist als MATLAB® Anzeige umgesetzt (Bild 5-19), welche dem Probanden auf einem vor ihm befindlichen Monitor ausgegeben wird.

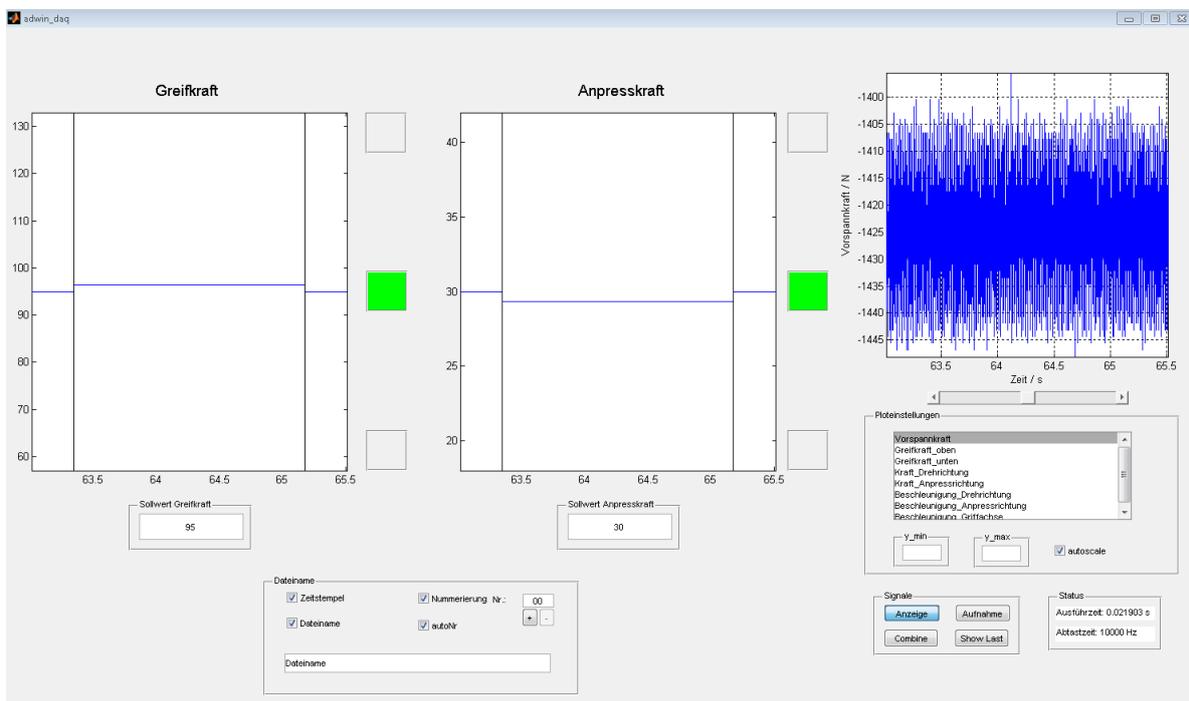


Bild 5-19: Anzeige der Soll- und Istwerte der Andruck- bzw. Greifkraft für den Probanden

Im linken Fenster wird der Soll-Wert der Greifkraft als Striche am linken und rechten Fensterrand dargestellt. Der Strich in der Mitte stellt den gleitenden Mittelwert als Ist-Wert dar. Der Strich verschiebt sich somit in Relation zum Soll-Wert Strich nach oben bzw. unten. Die Fensterhöhe ist auf 60% -140% des Sollwertes skaliert. Bei einer Abweichung von 10% vom Sollwert leuchten die Felder am unteren bzw. oberen

Fensterrand rot auf. Innerhalb der 10% Abweichung leuchtet das mittlere Feld grün. Analog wird im rechten Fenster der Soll- bzw. Ist-Wert der Andruckkraft dargestellt.

5.6.3 Kontrolle der Armhaltung des Probanden

Wie bereits beim Bohrhammer, wird der Einfluss der Armhaltung auf das Impulsschrauber-Verhalten untersucht. Die Kontrolle der Armhaltung erfolgt analog durch die in Abschnitt 5.3.3 am Bohrhammer dargestellte Methode. Es ergibt sich das in Bild 5-20 schematisch dargestellte Kamerabild des Probanden vor dem Gitternetz.

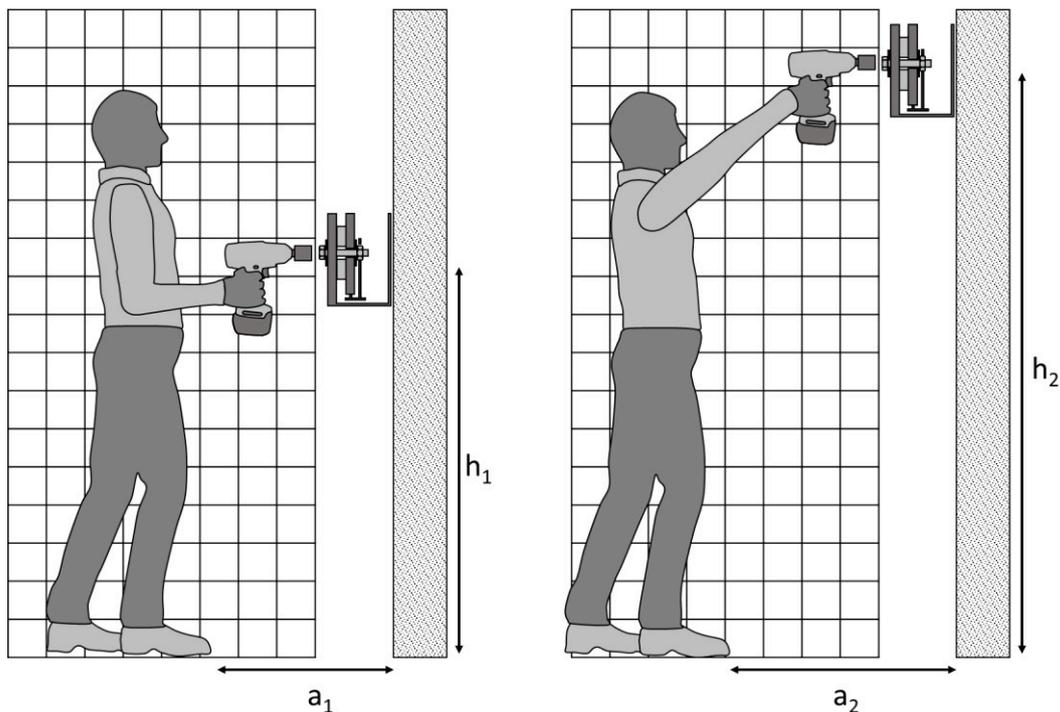


Bild 5-20: Aufbau zur Kontrolle der Armhaltung des Probanden am Impulsschrauber

Wie am Beispiel des Bohrhammers beschrieben, ergibt sich auch hier durch die Vorgabe des Fußabstandes a und der Höhe der Hand h durch den Probanden intuitiv eine stets gleiche, für den Probanden bequeme, Armhaltung.

5.6.4 Modell der Anwendung für die Versuche

Zur Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften auf die Vibration und das Power-Tool-Verhalten muss die Anwendung modellhaft im Labor abgebildet werden. Ein Hauptanwendungsgebiet von Impulsschraubern ist die Verschraubung zweier Platten im Stahlbau mit Durchschraubverbindungen. Aus einem vorangegangenen Projekt steht eine Messvorrichtung zur Untersuchung von

Schraubverbindungen zur Verfügung (detailliert in KEMPER¹⁷⁴ und ZIMMERMANN¹⁷⁵ und zusammenfassend in MATTHIESEN ET AL.¹⁷⁶ beschrieben), welche als Modell der Anwendung im Rahmen dieser Untersuchung genutzt wird. Wie am Beispiel des Bohrhammers dargelegt, müssen die anwendungsseitigen Interaktionen möglichst konstant gehalten werden. Die Messvorrichtung bietet die Möglichkeit, die entstehende Vorspannkraft zwischen zwei zueinander verschraubten Platten zu erfassen. Dies ermöglicht eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der werkstückseitigen Wechselwirkungen. Die in MATTHIESEN ET AL.¹⁷⁷ beschriebene Messvorrichtung ist in Bild 5-21 schematisch dargestellt.

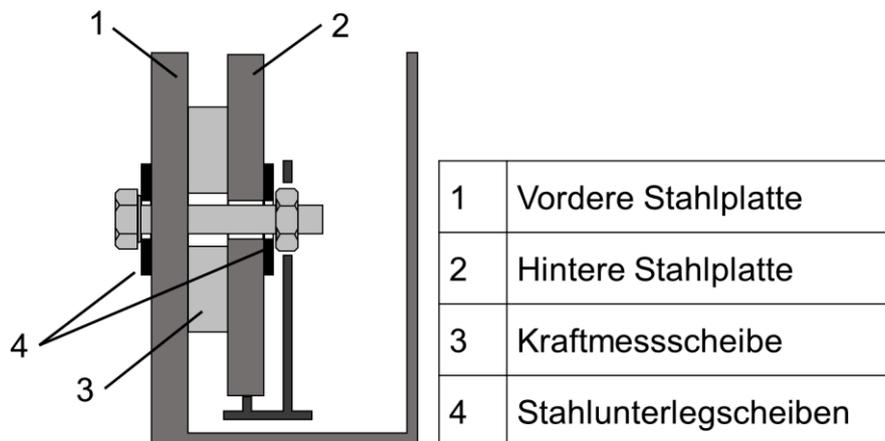


Bild 5-21: Modell der Anwendung für die Versuche. Messvorrichtung zur Erfassung der Vorspannkraft im Plattenverbund

Die Messvorrichtung ist auf Schraubengröße bis M10 und Vorspannkraft bis 40 kN ausgelegt. Die vordere Stahlplatte (1) ist raumfest angebracht, während die hintere Stahlplatte (2) in Richtung der Schraubachse beweglich gelagert ist. Zwischen den Platten kann die entstehende Vorspannkraft mittels einer DMS-Ring-Kraftmessscheibe ALF313 (Althen) erfasst werden. Die Signale der Kraftmessscheibe werden durch den DMS-Messverstärker SG-KP-24E-010-GF30 (Althen) verstärkt. Um eine Abnutzung der Stahlplatten und somit nicht reproduzierbare Zustände zu vermeiden, sind zwei gehärtete, gegen Verdrehung gesicherte Stahlunterlegscheiben (4) unter dem Schraubenkopf und unter der Mutter angebracht. Zur weiteren Steigerung der Reproduzierbarkeit der Anwendungsinteraktionen wird die Gewindereibung durch Fett reduziert. Zusätzlich wird der Schraubenverbund jeweils 20 mal vor einer Messreihe angezogen, um eine Glättung des Gewindes zu erreichen und um die Reproduzierbarkeit der Versuche weiter zu erhöhen. In durchgeführten

¹⁷⁴ vgl. Kemper 2013 (Bachelorarbeit)

¹⁷⁵ vgl. Zimmermann 2013 (Bachelorarbeit)

¹⁷⁶ vgl. Matthiesen et al. 2014

¹⁷⁷ vgl. Matthiesen et al. 2014

Vorversuchen hat sich ein harter Schraubfall mit einer Klemmlänge von 44mm und einer Schraubenfestigkeit von 12.9 als besonders streuungsarm bzgl. der erzeugten Vorspannkraft mit verschiedenen Anzugsverfahren herausgestellt. Für die Untersuchung wird die Schraubengröße M8 gewählt. Um eine Beeinflussung der anwendungsseitigen Wechselwirkungen durch die Andruckkraft zu unterbinden, wird die Länge der Nuss des Schraubers reduziert, so dass die Nuss nicht in Kontakt mit der Stahlunterlegscheibe kommen kann.

Um dem Anwender die Einnahme variierender Armhaltungen zu ermöglichen, kann die verwendete Messeinrichtung in verschiedenen Höhen an einer Alurahmenkonstruktion an einer Wand fixiert werden.

5.6.5 Messkette und Datenerfassung

Alle Daten werden durch ein Multi-I/O-Modul (Pro-II-MIO-4-ET1) im Mess- und Regelsystem ADwin-Pro II mit einer Abtastrate von 10 kHz erfasst. Die gesamte Messkette ist in Bild 5-22 dargestellt.

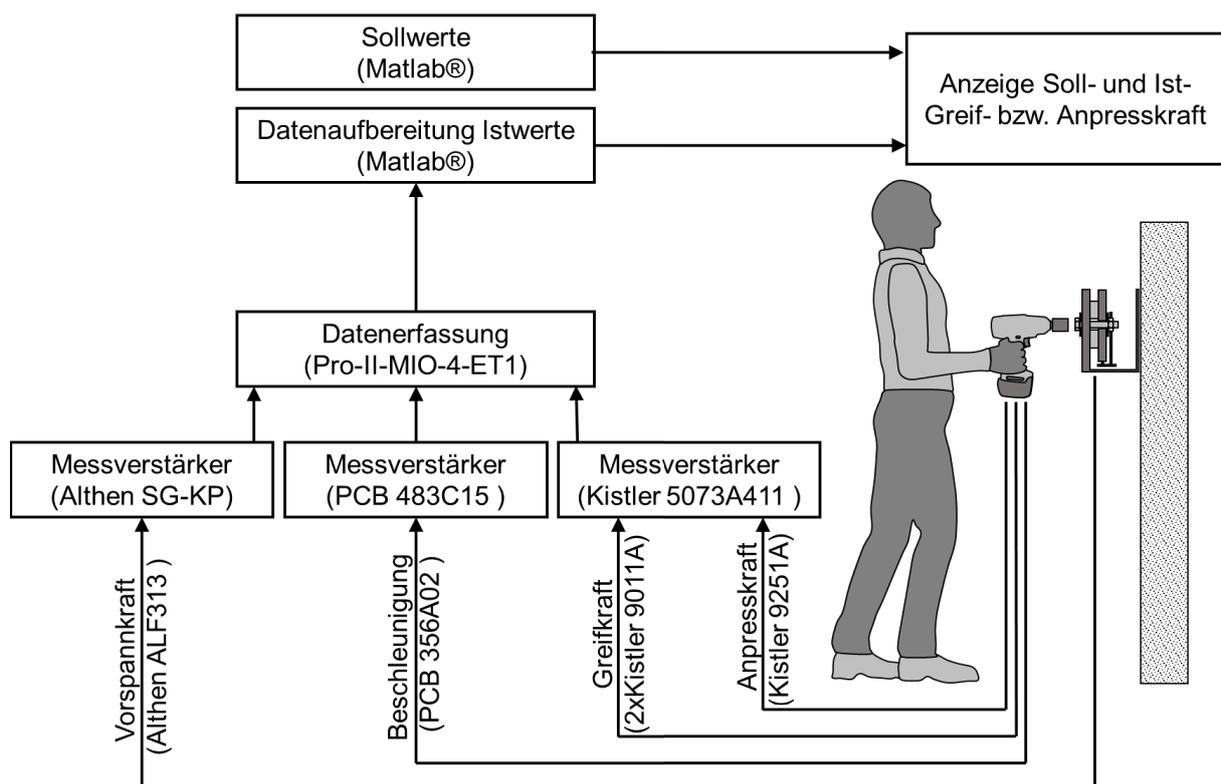


Bild 5-22: Messkette zur Kontrolle der aktiven Anwenderinteraktionen und Erfassung der Vibrationen am Power-Tool-Griff

Der Versuchsaufbau zur Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften auf die Vibration eines Impulsschraubers ist in Bild 5-23 illustrierend dargestellt.

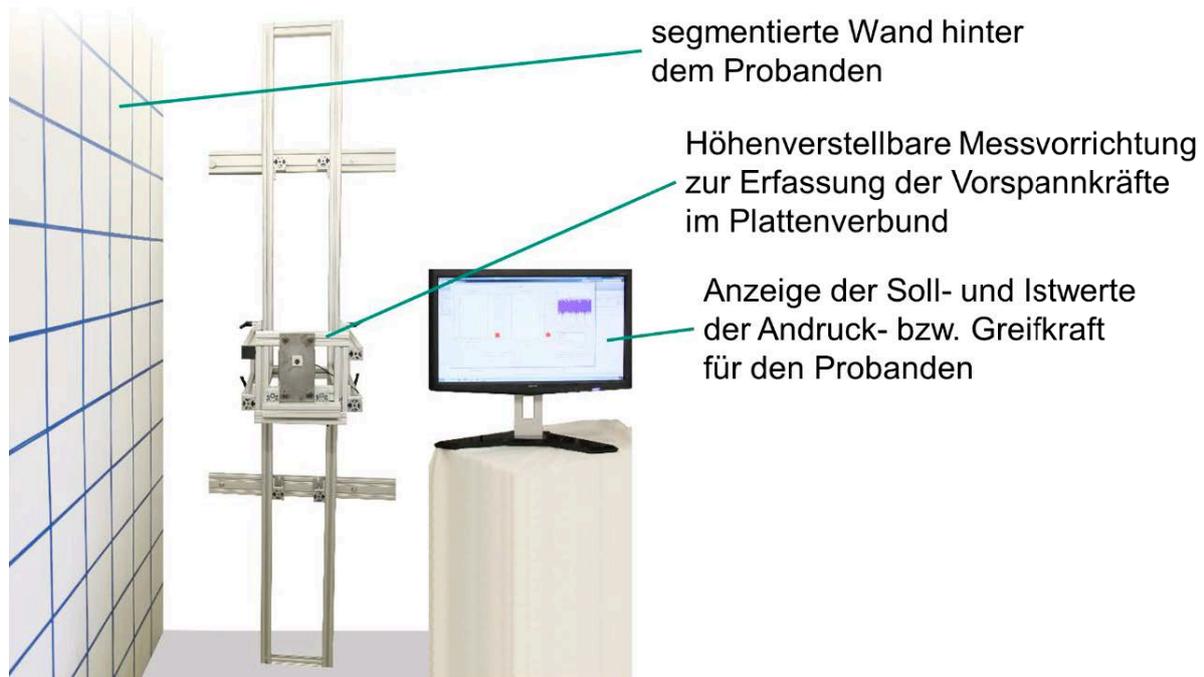


Bild 5-23: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschrauber¹⁷⁸

5.7 Untersuchung des Einflusses veränderlicher passiver Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Impulsschraubers (Methodenanwendungs- und -evaluierungsphase)

Die Versuche zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf einen Impulsschrauber wurden in enger Zusammenarbeit mit HÖLL¹⁷⁹ durchgeführt. Die Versuchsdaten werden im Kontext des Ziels dieser Arbeit neu ausgewertet und vorgestellt. Die Ergebnisse wurden bereits in MATTHIESEN ET AL.¹⁸⁰ publiziert.

5.7.1 Versuchsdesign

In Abschnitt 5.6 wurde die grundlegende Versuchsmethode vorgestellt. Innerhalb der Versuche wird der Einfluss der Parameter Proband, Haltung, Andruck- und Greifkraft auf den Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz untersucht werden. Die Parameter haben keinen direkt durch Funktionen beschreibbaren Zusammenhang mit den Beschleunigungseffektivwerten. Es wird aus diesem Grund ein zweistufiger vollfaktorieller Versuchsplan gewählt, da ein verkürzter Versuchsplan nicht zielführend scheint. Die untersuchten Faktorstufen sind in Tabelle 5-2 dargestellt.

¹⁷⁸ Matthiesen et al. 2018c, S. 163 (modifizierte Abbildung)

¹⁷⁹ vgl. Höll 2016 (vom Autor co-betreute Bachelorarbeit)

¹⁸⁰ vgl. Matthiesen et al. 2018c

Tabelle 5-2: Übersicht über die durchgeführten Versuche zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf die Beschleunigungseffektivwerte des Impulsschraubers

	Faktorstufen Ausprägung	
	Stufe 1 (-)	Stufe 2 (+)
Untersuchte Haltungen	Haltung 1 „Vor der Brust“ (vgl. Bild 5-20 links)	Haltung 2 „Über Kopf“ (vgl. Bild 5-20 rechts)
Untersuchte Probanden	Proband 1 (m) Körpergröße: 1,72 m Gewicht: 110 kg Alter: 30-35 Jahre	Proband 2 (m) Körpergröße: 1,73 m Gewicht: 75 kg Alter: 20-25 Jahre
Untersuchte Greifkräfte	20 N	95 N
Untersuchte Andruckkräfte	7 N	30 N
Wiederholungen	siehe Tabelle 5-3	
Mittelungszeit für Schwingungswerte	2,5 s	

Die Beschleunigungseffektivwerte werden wie in Abschnitt 5.2 vorgestellt ermittelt. Für jeden einzelnen Versuch wird folgendes Versuchsvorgehen festgelegt:

- 1) Nutzung einer eingelaufenen Schraubverbindung (mind. 20 mal und max. 150 mal angezogen)
- 2) Schmierung der Schraubverbindung unter dem Kopf und am Gewinde
- 3) Festschrauben der Schraube von Hand bis der Schraubenkopf auf der Stahlunterlegscheibe aufliegt
- 4) Rücksetzen der Kraft-Sensorelemente auf Piezo-Basis
- 5) Aufnahme des Impulsschraubers durch den Probanden und Einnahme der korrekten Haltung mit Hilfe von Markierungen auf dem Boden und Anweisungen des Versuchsleiters auf Basis des Kamerabildes
- 6) Einnahme der Andruck- und Greifkraft durch den Probanden
- 7) Beginn der Messung und der Verschraubung
- 8) Ende der Messung sobald keine feststellbare Änderung der gemessenen Vorspannkraft durch den Schrauber mehr erfolgt.

Wie in Abschnitt 5.6 dargestellt, ist es notwendig, dass der Einfluss der Anwendung und des Power-Tools auf den Beschleunigungseffektivwert in den Versuchsreihen (Serie von Versuchen gleicher Versuchseinstellung) möglichst konstant gehalten wird. Da die Schraubverbindung nach ca. 150 Versuchen merklich verschleißt (Vorversuche aus HÖLL¹⁸¹), muss diese nach jeweils einer Versuchsreihe ausgetauscht werden. Der Akku muss zwischen den Versuchsreihen ebenfalls gewechselt werden. Da sowohl die Verschraubung, der Akkuladestand als auch Effekte im Power-Tool wie beispielsweise die Power-Tool-Erwärmung einen Einfluss auf die Beschleunigungseffektivwerte haben können, ist eine Bewertung der veränderten Versuchsrandbedingungen notwendig. Hierfür wird zunächst ein Vorversuch mit veränderten Akkuladeständen und Schraubverbindungen durchgeführt.

5.7.2 Einfluss des Power-Tools, der Umwelt und der Anwendung auf den Beschleunigungseffektivwert des Impulsschraubers

Bild 5-24 zeigt den gemessenen Effektivwert der Beschleunigung bei der Impulsschrauber-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFW} für jeweils elf Einzelmessungen (Datenpunkte im Diagramm) für vier unterschiedliche Schraubverbände (schwarze Punkte – linke Skala) mit jeweils vollgeladenem Akku. Ebenfalls ist für jeden Versuch jeweils die erzeugte Vorspannkraft im Schraubenverbund als zusätzliche Referenz aufgetragen (graue Punkte – rechte Skala). Die Versuche sind hierbei, unter Nutzung der in Abschnitt 5.6 beschriebenen Methoden, bei einer Andruckkraft von 7 N und einer Greifkraft von 20 N in Haltung 1 von Proband 1 durchgeführt worden.

¹⁸¹ vgl. Höll 2016 (vom Autor co-betreute Bachelorarbeit)

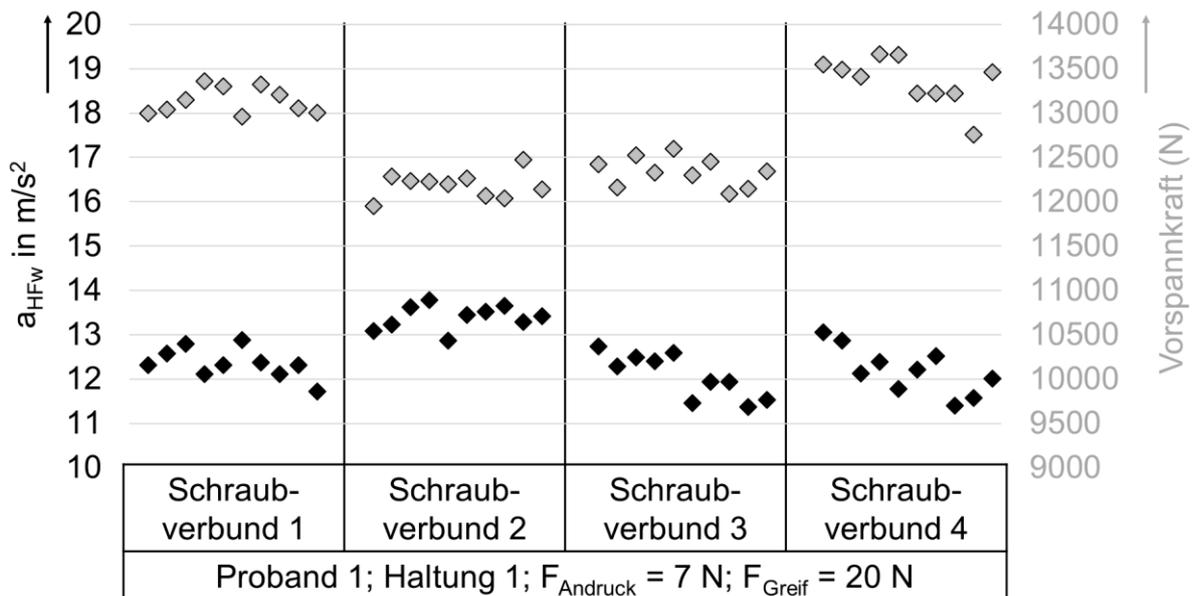


Bild 5-24: Verteilung des Effektivwerts der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} (schwarz) und der erzeugten Vorspannkraft im Schraubenverbund (grau) für verschiedene Kombinationen Schraube und Mutter

Sowohl der a_{HFw} -Wert als auch die gemessene Vorspannkraft hängen vom Zusammenspiel aus Werkstückstreuung (Schraubverbund), internem Power-Tool-Zustand und Akkuladung ab.

Die gemessenen Vorspannkräfte weisen einen erheblichen Stufensprung zwischen zwei Versuchsreihen (jeweils ein Schraubverbund) auf. Im Verlauf einer jeweiligen Versuchsreihe zeigt sich die Vorspannkraft nicht sensitiv gegenüber eventuellen kurzzeitigen Streuungen von Power-Tool-internen Parametern und anwendungsseitigen Einflüssen. Die erzeugte Vorspannkraft variiert in einem jeweils schraubverbundspezifischen Korridor der Vorspannkraft.

Der gemessene Effektivwert der Beschleunigung bei der Impulsschrauber-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} weist ebenfalls Stufensprünge zwischen den unterschiedlichen Versuchsreihen auf. Im Schraubverbund 3+4 ist zudem eine leichte versuchsreiheninterne Drift¹⁸² der gemessenen a_{HFw} -Werte zu beobachten.

Aus den Erkenntnissen der Versuche lässt sich das Versuchsdesign weiter konkretisieren. Versuche, die direkt nacheinander durchgeführt werden, weisen nur geringe Abweichungen auf, die aus der Versuchsstreuung resultieren, da die versuchsreihen-interne Drift nicht hoch ist. Über Versuchsreihen hinweg sollten keine Schlüsse auf Basis absoluter Werte gezogen werden, da es Stufensprünge beim

¹⁸² Zu beachten ist, dass die Ordinatenachse nicht bei null beginnt, um den leichten Drift zu visualisieren.

Wechsel des Schraubverbundes geben kann. Die Parameter anthropometrische Charakteristiken und Konstitution, Armhaltung, Greifkraft und Andruckkraft bilden in einem zweistufigen vollfaktoriellen Versuchsplan 16 mögliche Einstellungen. Da jedoch die Versuchsreihen nicht untereinander vergleichbar sind, wird in jeder möglichen Parameterkonfiguration nur ein Parameter alterniert, was sich auch im Versuchsplan in Tabelle 5-3 widerspiegelt. Nach dem in Tabelle 5-3 dargestellten Versuchsablauf ergeben sich somit 32 anstatt 16 Versuchseinstellungen. Jede Versuchseinstellung liegt somit in vier Replikationen vor, welche sich jedoch nicht direkt untereinander vergleichen lassen.

Tabelle 5-3: Schema der 32 Versuchseinstellungen im zweistufigen vollfaktoriellen Versuchsplan

Versuchsreihe Nr:	Parameter 1 (Proband)	Parameter 2 (Greifkraft)	Parameter 3 (Andruckkraft)	Parameter 4 (Haltung)
1	+	+	+	22 Versuche alternierend +/-
2	+	+	-	22 Versuche alternierend +/-
3	+	-	+	22 Versuche alternierend +/-
4	+	-	-	22 Versuche alternierend +/-
...
9	+	+	22 Versuche alternierend +/-	+
10	+	+	22 Versuche alternierend +/-	-
11	+	-	22 Versuche alternierend +/-	+
12	+	-	22 Versuche alternierend +/-	-
...
32	22 Versuche alternierend +/-	-	-	-

5.7.3 Ergebnisse und Diskussion

5.7.3.1 Darstellung der Ergebnisse zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf die Effektivwerte der Beschleunigung des Impulsschraubers

In Bild 5-25 ist das Auswertungsprinzip für die Versuche zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf den Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} eines Impulsschraubers dargestellt.

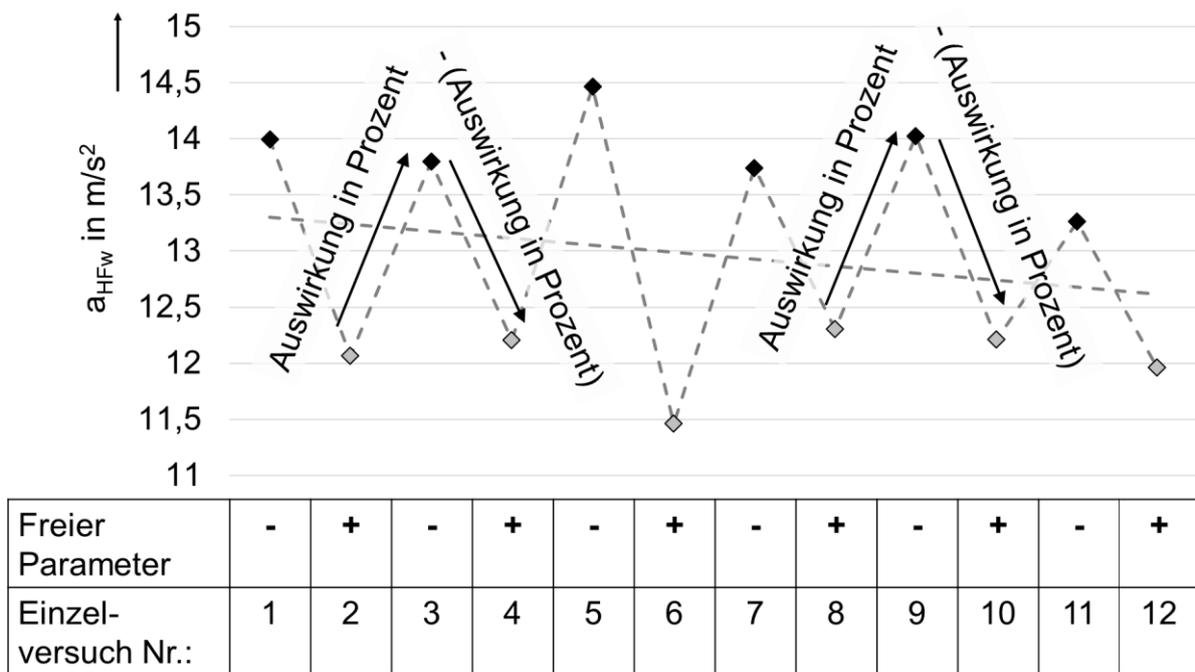


Bild 5-25: Auswertungsprinzip zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf den Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} eines Impulsschraubers

Wie in Abschnitt 5.7.1 festgestellt, kann die Auswirkung veränderter passiver Anwendereigenschaften jeweils nur bei zwei direkt nacheinander stattfindenden Versuchen erfolgen. In Bild 5-25 ist ein Ausschnitt aus einer Versuchseinstellung (beliebige Zeile in Tabelle 5-3) exemplarisch dargestellt. Die Daten entspringen hierbei Versuchen mit drei sich nicht verändernden Parametern und einem alternierenden Parameter - beispielsweise Greifkraft Stufe (-), Andruckkraft Stufe (+), Person (anthropometrische Charakteristiken und Konstitution) Stufe (-) und alternierende Haltung von Stufe (-) auf Stufe (+). Die Auswirkungen der Veränderung des alternierenden Parameters Haltung von Stufe (-) auf Stufe (+) kann prozentual, wie in Bild 5-25 dargestellt, auf die Stufe (-) bezogen angegeben werden. Dies ist, mit Ausnahme des ersten und letzten Datenpunktes der Versuchsreihe, bei jedem Datenpunkt in zwei Richtungen (Versuch zuvor und danach) möglich. Aus den in einer Versuchseinstellung durchgeführten 22 Einzelmessungen lassen sich somit 20 Werte

entnehmen, die den prozentualen Einfluss des jeweils alternierenden Parameters auf die Effektivwerte der Beschleunigung quantifizieren. Durch die prozentuale Angabe wird eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die Versuchseinstellungen hinweg ermöglicht. Eine eventuell vorhandene kleine Drift der Daten beeinflusst die Ergebnisse durch dieses Vorgehen kaum. Dieses Vorgehen ist möglich, weil die Steigung dieser Drift über die Versuche klein ist (vgl. Bild 5-25 – Steigung Ausgleichsgerade¹⁸³).

Die Ergebnisse der Versuche werden wie in Bild 5-26 definiert dargestellt. Die aus den Versuchen errechneten prozentualen Beschleunigungseffektivwertänderungen bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} sind jeweils als rautenförmige Datenpunkte dargestellt. Die Auswertung bezieht sich jeweils auf 10 Einzelversuche der 20 vorhandenen Werte einer Versuchsreihe. Als Auswahlkriterium wird die Minimierung der Abweichung zwischen Soll- und Ist-Kräften (Summe der Abweichung zwischen Andruck- und Greifkraft) gewählt.

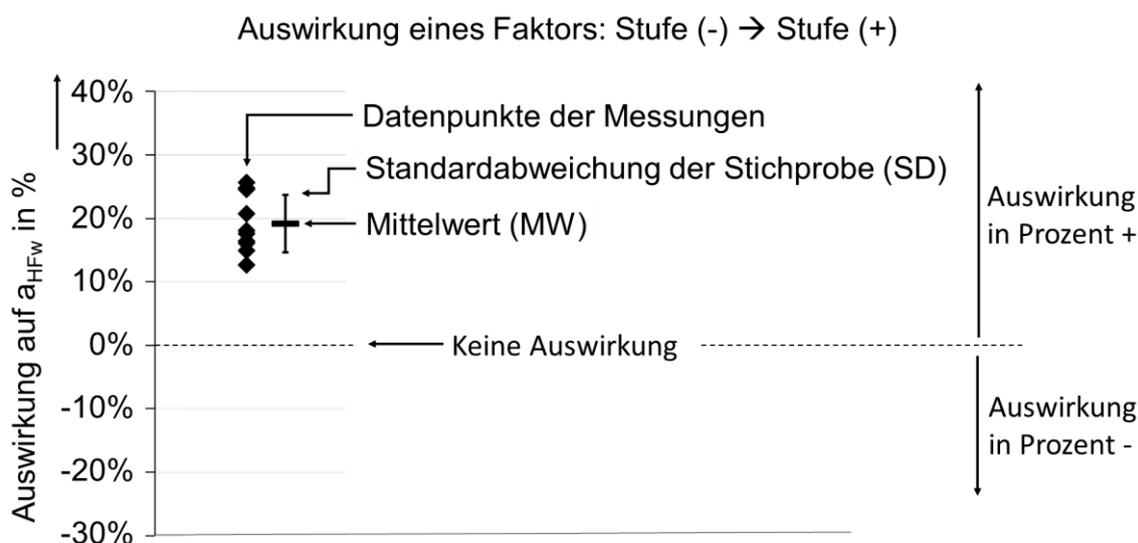


Bild 5-26: Darstellungsprinzip der Ergebnisse zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf den Effektivwert der Beschleunigung des Impulsschraubers

Die Balkenmarkierung gibt den Mittelwert (MW) der prozentualen Beschleunigungseffektivwertänderungen der 10 Einzelversuche an. Über bzw. unter der Balkenmarkierung ist die Standardabweichung der Stichprobe (SD) positiv und negativ als Fehler-Whisker (schwarze Linien über und unter dem Balken) abgetragen. Eine Spalte in diesen Darstellungen entspringt jeweils einer Versuchsreihe. Ein vollständiges Diagramm (vgl. beispielsweise Bild 5-28) beinhaltet alle durchgeführten

¹⁸³ Ordinatenachse beginnt nicht bei null – zur Visualisierung hier stark vergrößert

Versuchsreihen zum Einfluss eines Parameters, bei einer vollfaktoriellen Variation der verbleibenden Parameter (insgesamt 8 Versuchseinstellungen).

Da die Stichprobengröße innerhalb dieser Arbeit nicht hoch ist, wird erst von einem messbaren Einfluss ausgegangen, wenn der Mittelwert inklusive der Standardabweichung der Stichprobe (SD) (Fehler-Whisker) über bzw. unter der 0%-Linie liegt. Je kleiner SD in Relation zu MW, desto sicherer kann von einem Einfluss ausgegangen werden. Je höher der Betrag des Mittelwertes, desto größer ist die Einflussstärke eines Versuchsparameters. Aus der Literatur bekannte Effektstärken wie cohens d sind für diese Versuche nicht anwendbar, da diese in dem hier nötigen Versuchsdesign nicht eindeutig definiert sind. Die Auswertung mit Mittelwert und Standardabweichung setzt jedoch auf den gleichen statistischen Werten wie der cohens d Wert an.

5.7.3.2 Eignung des Beschleunigungseffektivwertes a_{HFw} zur Quantifizierung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschrauber

In Bild 5-27 sind die Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Impulsschraubers bei Variation von Proband, Greifkraft, Andruckkraft und Haltung für einen Auszug der Versuche dargestellt.

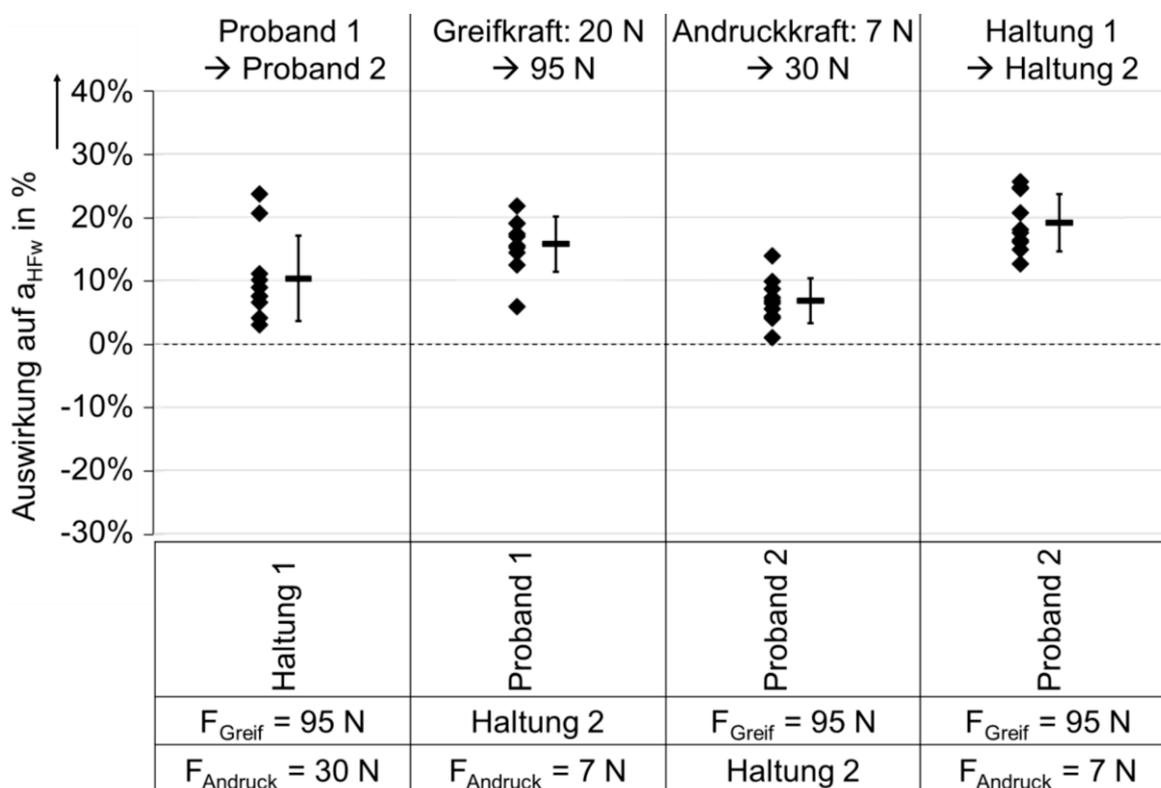


Bild 5-27: a_{HFw} -Wert des Impulsschraubers bei Variation von Proband, Greifkraft, Andruckkraft und Haltung

Die Variation der vier Einflussparameter Proband, Greifkraft, Andruckkraft und Haltung, führen bei den hier dargestellten Versuchsreihen dazu, dass der a_{HFw} -Wert deutlich messbar ansteigt. Der Effektivwert a_{HFw} zeigt sich somit sensitiv gegenüber den vier Parametern. Er kann somit genutzt werden, um den Einfluss dieser Parameter auf das Bewegungsverhalten des Impulsschraubers zu untersuchen.

5.7.3.3 Einfluss der Haltung auf den Beschleunigungseffektivwert des Impulsschraubers

Bild 5-28 zeigt den prozentualen Einfluss beim Übergang der Probanden von Haltung 1 auf Haltung 2, auf den Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Impulsschraubers.

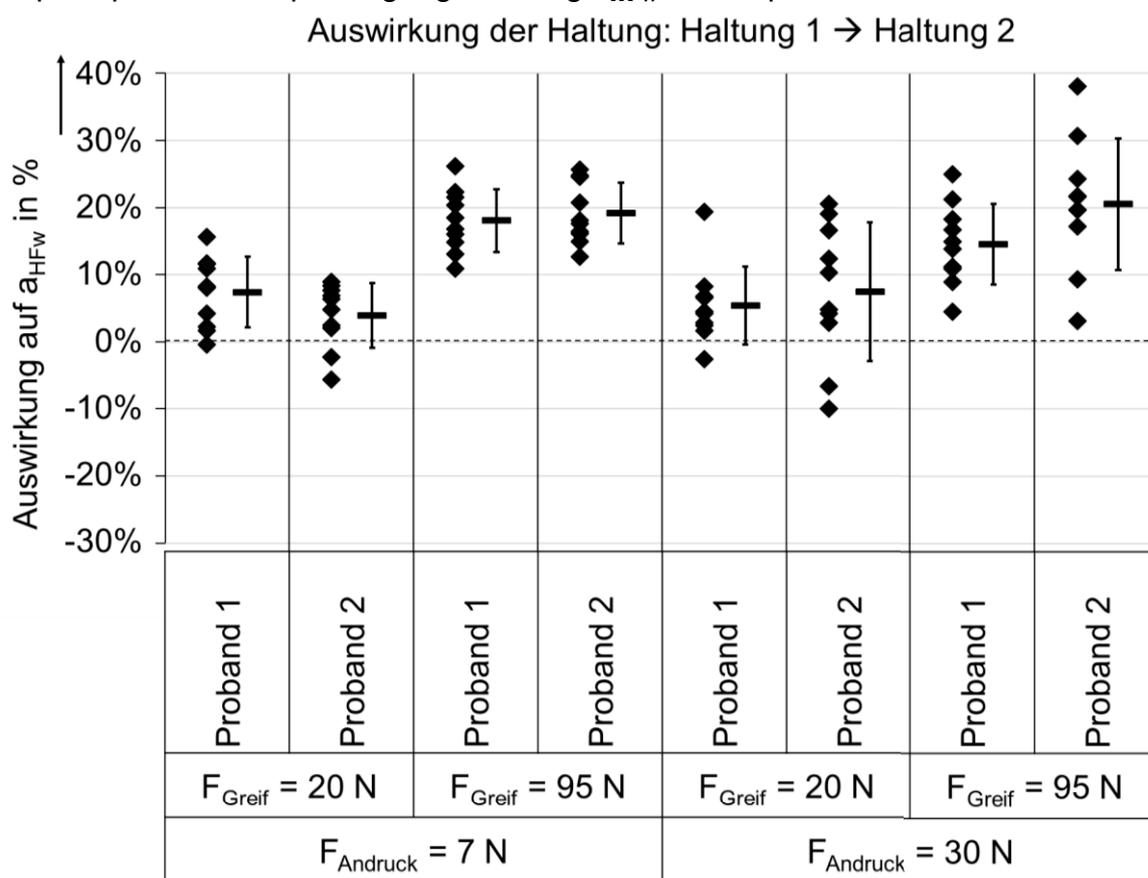


Bild 5-28: Einfluss der Haltung auf den a_{HFw} -Wert des Impulsschraubers

Bei allen untersuchten Parametervariationen mit hoher Greifkraft steigt der a_{HFw} -Wert beim Übergang von Haltung 1 zu Haltung 2 deutlich an (bis zu MW: 19,2% bei SD: 4,6%). Die Auswirkung der Haltungsvariation ist bei beiden Probanden ähnlich. Bei reduzierter Greifkraft von 20 N ergibt sich ein verringerter Einfluss der Haltung auf den Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Impulsschraubers gegenüber der Greifkraft von 95 N bei Proband 1 (bis zu MW: 7,4% bei SD: 5,3%). Für Proband 2 kann hier kein

messbarer Einfluss der Haltung festgestellt werden ($SD \geq MW$). Die Gesamtstreuung zeigt keine erkennbaren Abhängigkeiten von den untersuchten Parametern.

Es kann geschlossen werden, dass die Haltung das grundlegende Bewegungsverhalten des Impulsschraubers bei allen untersuchten Parameterkombinationen in gleicher Tendenz verändert. Das Bewegungsverhalten wird hierbei bei hoher Greifkraft stark verändert; bei niedriger Greifkraft schwächer, aber je nach Proband immer noch deutlich. Eine Erklärung hierfür kann, wie bereits in Abschnitt 5.4.3.3 diskutiert, das stärker angekoppelte Hand-Arm System sein. Eine Andruckkraftabhängigkeit des Haltungseinflusses kann nicht festgestellt werden. Zusammen mit den Grundannahmen aus Abschnitt 5.1 ergibt sich somit die Aussage, dass die durch die Haltung des Probanden veränderten passiven Anwendereigenschaften einen Einfluss auf die Beanspruchung des Impulsschraubers haben können.

5.7.3.4 Einfluss der Andruckkraft auf die Beschleunigungseffektivwerte des Impulsschraubers

Der prozentuale Einfluss der Andruckkraftänderung von 7 N auf 30 N auf den Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Impulsschraubers ist in Bild 5-29 dargestellt.

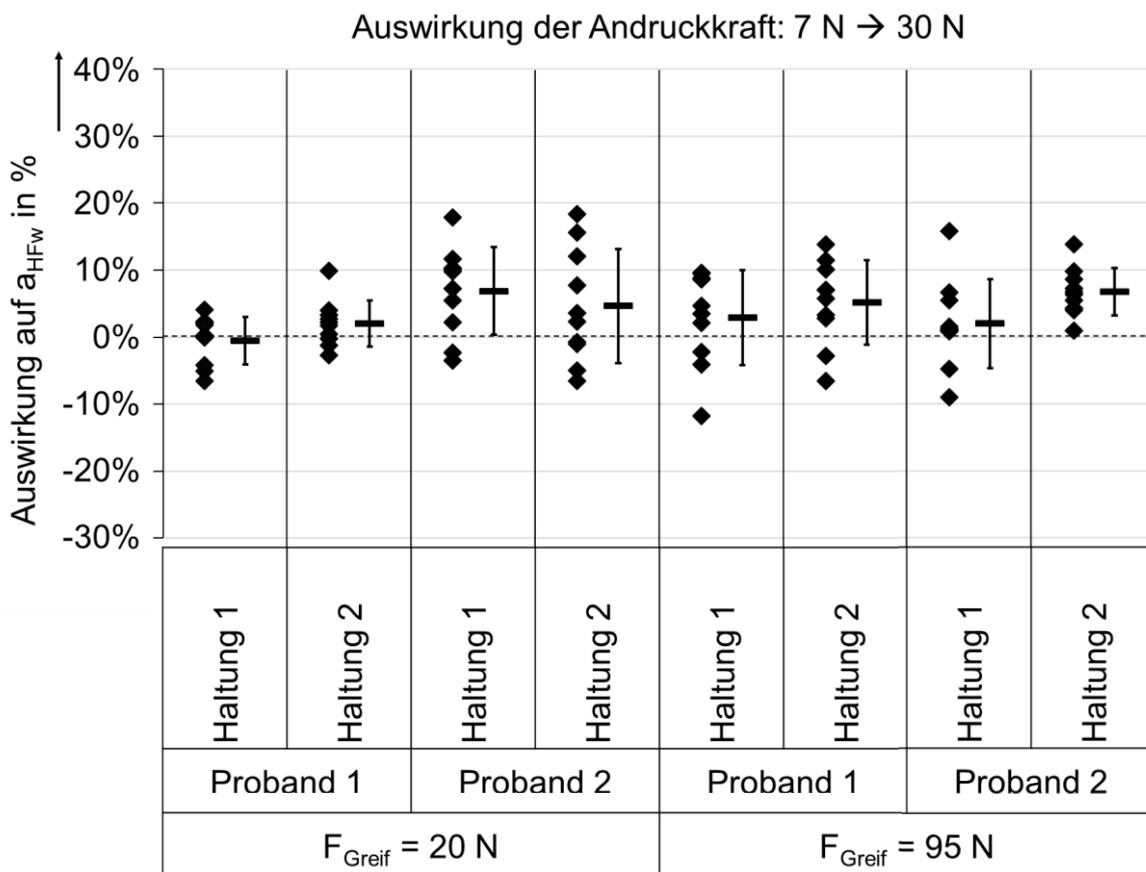


Bild 5-29: Einfluss der Andruckkraft auf den a_{HFw} -Wert des Impulsschraubers

Eine Steigerung der Andruckkraft von 7 N auf 30 N hat in den meisten untersuchten Parameterkonfigurationen kaum messbare Auswirkungen auf den Effektivwert der Beschleunigung a_{HFw} des Impulsschraubers. Bei Proband 2 tritt unsystematisch in zwei der vier Fälle eine messbare Veränderung des a_{HFw} -Wertes auf (bis zu MW: 6,7% bei SD: 3,5%). Eine Abhängigkeit zwischen andruckkraftabhängiger Veränderung des a_{HFw} -Mittelwertes und den übrigen untersuchten Parametern kann nicht erkannt werden. Die Streuung der prozentualen Änderung der Effektivwerte innerhalb der Versuche zeigt keine Abhängigkeit zu den untersuchten Parametern.

Über die gesamten Versuchsreihen zum Einfluss der Andruckkraft gesehen ergibt sich ein schwacher Einfluss der Andruckkraft auf das grundlegende Bewegungsverhalten des Impulsschraubers in gleicher Tendenz. Bei zwei Parametervariationen ist ein Einfluss sicher messbar. Eine Veränderung der Beanspruchung des Impulsschraubers durch die andruckkraftbedingte Veränderung der passiven Anwendereigenschaften ist somit nach Abschnitt 5.1 gegenüber anderer Faktoren schwach aber in bestimmten Fällen möglich.

5.7.3.5 Einfluss der Greifkraft auf die Beschleunigungseffektivwerte des Impulsschraubers

Bild 5-30 zeigt den prozentualen Einfluss beim Übergang der Greifkraft von 20 N auf 95 N auf den Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Impulsschraubers.

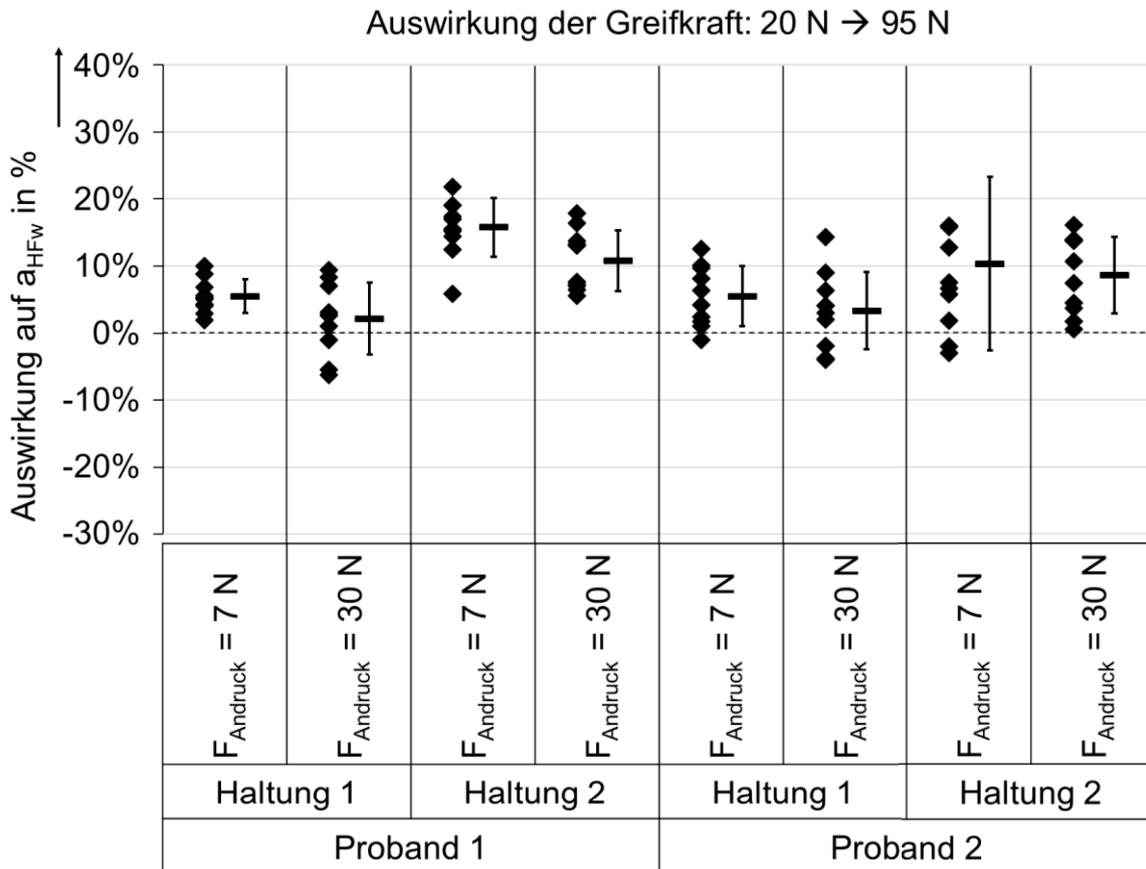


Bild 5-30: Einfluss der Greifkraft auf den a_{HFw} -Wert des Impulsschraubers

Alle Mittelwerte der prozentualen Änderungen bei einer Veränderung der Greifkraft von 20 N auf 95 N fallen für den a_{HFw} -Wert positiv aus (bis zu MW: 15,8% bei SD: 4,4%). Eine Erhöhung der Greifkraft führt in 5 der 8 untersuchten Parametervariation zu einem messbaren Einfluss auf den a_{HFw} -Wert ($SD \leq MW$). In Haltung 2 ist der Einfluss der Greifkraftveränderung höher als in Haltung 1. Tendenziell hat die Greifkraft bei höherer Andruckkraft weniger Einfluss. Eine Abhängigkeit der Streuung von den untersuchten Parametern lässt sich nicht ableiten.

Es kann geschlossen werden, dass die Greifkraft das grundlegende Bewegungsverhalten des Impulsschraubers abhängig vom untersuchten Probanden und der Haltung ändert. Zusätzlich ist der in Abschnitt 5.7.3.3 dargestellte Einfluss der Greifkraft auf den Haltungseinfluss anzuführen. Zusammen mit den Grundannahmen aus Abschnitt 5.1 ergibt sich somit die Aussage, dass die passiven

Anwendereigenschaften, die sich durch die Greifkraft des Probanden variieren lassen, die Beanspruchung des Impulsschraubers verändern können.

5.7.3.6 Einfluss des Probanden auf die Beschleunigungseffektivwerte des Impulsschraubers

Der Einfluss des Probanden auf den Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Impulsschraubers ist in Bild 5-31 dargestellt.

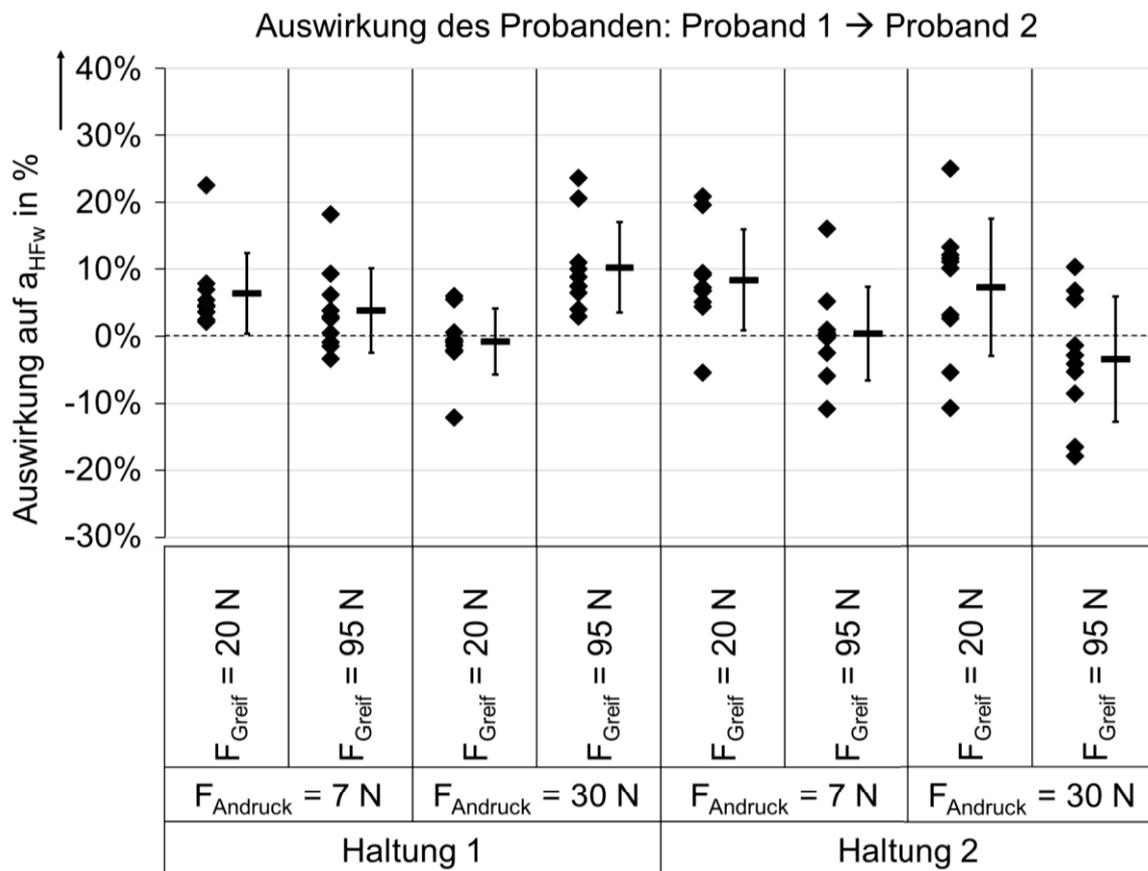


Bild 5-31: Einfluss des Probanden auf den a_{HFw} -Wert des Impulsschraubers

Die untersuchten Probanden haben einen unsystematischen Einfluss auf den a_{HFw} -Wert des Impulsschraubers. Die prozentuale a_{HFw} -Mittelwertänderung liegt zwischen minimal -3,4% und maximal 10,2%. Trotz der Heterogenität des Einflusses ist in zwei der durchgeführten acht Parametervariationen ein deutlich messbarer Einfluss erkennbar, der in seiner Tendenz gleich ausfällt (bis zu MW: 10,2% bei SD: 6,7%). Die restlichen sechs Variationen zeigen zum Teil gegenläufige Tendenzen des Einflusses. Eine Abhängigkeit zwischen probandenabhängiger Veränderung des a_{HFw} -Mittelwertes und den übrigen untersuchten Parametern kann hierbei nicht erkannt werden. Die untersuchten Versuchseinstellungen beeinflussen die Streubreite der Effektivwerte kaum.

Der Proband beeinflusst zum Teil die Grundschiwingung des Power-Tools und führt zum Teil zu einer zwar schwachen aber deutlich messbaren a_{HFw} -Wertänderung. Unter der Annahme, dass sich durch den Probanden bei gleicher Greifkraft, Andruckkraft und Haltung nur die anthropometrischen Charakteristiken bzw. die Konstitution des Anwenders ändern, lässt sich die Aussage auf den Einfluss der anthropometrischen Charakteristiken bzw. der Konstitution übertragen. Es lässt sich somit unter Berücksichtigung der Grundannahmen aus Abschnitt 5.1 feststellen, dass die anthropometrischen Charakteristiken bzw. die Konstitution des Anwenders einen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Impulsschraubers aufweisen und somit die Beanspruchung des Impulsschraubers verändern können.

5.8 Zwischenfazit zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf das Bewegungsverhalten am Beispiel eines Impulsschraubers

Wie bei den Versuchen am Bohrhämmer wird das Bewegungsverhalten des Impulsschraubers durch die Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} in einer skalaren Größe ausgedrückt, die das dominierende Bewegungsverhalten widerspiegelt. Unter Berücksichtigung der Grundannahmen kann in Bezug zur ersten Unterfrage der Forschungsfrage 1 festgestellt werden:

Forschungsfrage 1: Einfluss der passiven Anwendereigenschaften

Wie kann der Einfluss auf ein Power-Tool quantifiziert werden?

Der Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} zeigt sich am Impulsschrauber sensitiv gegenüber der Variation von Greif- und Andruckkraft, Haltung und Proband. Da sich durch diese Faktoren die passiven Anwendereigenschaften beeinflussen lassen, kann der Effektivwert somit für eine Quantifizierung des passiven Anwendereinflusses auf das Bewegungsverhalten des Impulsschraubers genutzt werden. Unter Einbeziehung der Grundannahmen aus Abschnitt 5.1 ist der Effektivwert geeignet, um den Einfluss veränderter passiver Anwendereigenschaften auf den Impulsschrauber in manuellen Tests während der Hauptfunktionserfüllung zu erforschen und um abzuleiten, ob diese zu einer veränderten Beanspruchung führen können.

Die in Abschnitt 5.6 entwickelte Versuchsmethode eignet sich, um die Greif- und Andruckkraft des Anwenders bei der Bedienung eines Impulsschraubers einzustellen. Das in Abschnitt 5.6.2 entwickelte grafische Anzeigesystem zur Anzeige der Soll- und Istwerte von Andruck- bzw. Greifkraft ist dem in Abschnitt 5.3.2 am Bohrhammer entwickelten numerischen und farblich kodierten Anzeigesystem klar überlegen. Eine Unsicherheit der Probanden bei der Einnahme der entsprechenden Kräfte kann im Gegensatz zum Anzeigesystem aus Abschnitt 5.3.2 nicht mehr beobachtet werden. Die in Abschnitt 5.6.2 beschriebene Methode des gleitenden Mittelwertes zur Anzeige der Ist-Werte erweist sich als deutlich geeigneter als die diskret variierenden Werte mit entsprechender Abtastrate. Der Überkompensation der Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Wert durch den Anwender, die beim Bohrhammer beobachtet wurde, konnte deutlich entgegengewirkt werden.

Die entwickelte Methode zur Einnahme der Armhaltung wurde unverändert aus den Versuchen am Bohrhammer übernommen und erweist sich auch am Impulsschrauber als zielführend.

Es konnte in dieser Arbeit somit aufgezeigt werden, dass die entwickelten Methoden auf ein anders Beispielsystem übertragbar sind und an diesem Beispielsystem, wie auch schon am Bohrhammer, die Andruck- und Greifkraft sowie die Haltung des Probanden in dem zur hier durchgeführten Untersuchung erforderlichen Rahmen reproduzierbar eingenommen werden können.

Die prozentualen Änderungen der Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFW} zeigen sich in den Versuchen unterschiedlich sensitiv gegenüber Haltungs-, Andruckkraft- und Greifkraftänderung des Probanden. Alle drei Faktoren haben jedoch einen messbaren Einfluss auf die entstehende Streuung der entsprechenden prozentualen Veränderungen. In den Abschnitten 5.4.3.2 bis 5.4.3.6 wurde festgestellt, dass die Streuung der prozentualen Abweichung des Beschleunigungseffektivwertes nicht von den untersuchten Parametern abhängt. Die Andruckkraft-, Greifkraft- und Haltungsänderung des Probanden kann somit in geeignetem Maße konstant gehalten werden. In Bezug zur zweiten Unterfrage der ersten Forschungsfrage aus Abschnitt 4.2 lässt sich somit feststellen:

Forschungsfrage 1: Einfluss der passiven Anwendereigenschaften

Mit welchen Mitteln lassen sich die aus dem Stand der Forschung bekannten Einflüsse auf die mechanisch-dynamischen Anwendereigenschaften bei einer Untersuchung einstellen?

Eine Einstellung der aus dem Stand der Forschung bekannten Einflüsse auf die mechanisch-dynamischen Anwendereigenschaften während der Versuche ist durch die in Abschnitt 5.3 am Bohrhammer entwickelte und in Abschnitt 5.6 übertragene Methode am Impulsschrauber möglich.

Der Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} zeigt sich am Impulsschrauber abhängig von den vier untersuchten Parametern Andruck- und Greifkraft, Haltung und Proband. Unter der Annahme, dass sich beim Wechsel des Probanden unter gleicher Haltung, Andruck- und Greifkraft nur die anthropometrischen Charakteristiken bzw. die Konstitution des Anwenders verändern, zeigt sich der a_{HFw} -Wert auch sensitiv gegenüber diesem Haupteinflussfaktor. Für alle vier untersuchten Parameter kann geschlossen werden, dass die Veränderungen der Beschleunigungseffektivwerte durch die veränderten passiven Anwendereigenschaften hervorgerufen werden. Insbesondere ist der gemessene schwache Einfluss, im Gegensatz zu den Erkenntnissen am Bohrhammer, auch den Veränderungen der passiven Anwendereigenschaften durch eine veränderte Andruckkraft zuordenbar, da sowohl im Power-Tool als auch bei den Untergrundwechselwirkungen keine Abhängigkeit von der Andruckkraft vermutet werden muss.

Mit der am Bohrhammer entwickelten und auf den Impulsschrauber übertragenen Methode ist eine im Stand der Forschung bislang nicht vorhandene Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften, die sich durch Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders verändern lassen, auf das Bewegungsverhalten eines Impulsschraubers gelungen. Ein Novum bilden ebenfalls die Erkenntnisse zum potentiellen Einfluss der einzelnen Parameter auf die Beanspruchung des Impulsschraubers.

Unter Nutzung der in Abschnitt 5.1 formulierten Grundannahmen lässt sich die erste Forschungsfrage aus Abschnitt 4.2 somit für den Impulsschrauber zusammenfassend wie folgt beantworten:

Forschungsfrage 1: Einfluss der passiven Anwendereigenschaften

Haben die passiven Anwendereigenschaften, welche sich durch Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders verändern, einen Einfluss auf einen untersuchten Bohrhammer und Impulsschrauber in manuellen Tests während der Hauptfunktionserfüllung und können diese zu veränderten Beanspruchungen führen?

Die variierenden passiven Anwendereigenschaften, die sich durch Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders verändern lassen, haben einen Einfluss auf das grundlegende Bewegungsverhalten des Impulsschraubers im manuellen Test während der Hauptfunktionserfüllung. Sie können deshalb die Beanspruchungen des Impulsschraubers verändern.

5.9 Fazit zur Relevanz passiver Anwendereigenschaften in manuellen Power-Tool-Tests

Die in Abschnitt 5.1 definierten zu untersuchenden Einflussfaktoren auf die passiven Anwendereigenschaften sind: Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders. Die übrigen Faktoren wurden über die Versuche konstant gehalten. Durch die in dieser Arbeit entwickelte Methode konnte der Einfluss der einzelnen Faktoren erstmalig an zwei Beispielsystemen exemplarisch aufgezeigt werden. Es wurde weiter gezeigt, dass die Methode zwischen zwei Beispielsystemen übertragbar ist. Die untersuchten Faktoren haben je nach Faktor stärkeren oder schwächeren aber, mit Ausnahme der Greifkraft beim Bohrhammer, immer einen sicher messbaren Einfluss auf das grundlegende Bewegungsverhalten des untersuchten Bohrhammers und Impulsschraubers im manuellen Test während der Hauptfunktionserfüllung. Beim Bohrhammer ist der Einfluss der Greifkraft hierbei nicht direkt aber indirekt über ihre Auswirkung auf den Haltungseinfluss erkennbar. Unter Nutzung der in Abschnitt 5.1 formulierten Grundannahmen lässt sich somit feststellen, dass die untersuchten Faktoren, welche nach dem Stand der Forschung die passiven Anwendereigenschaften verändern, einen Einfluss auf die Beanspruchung der untersuchten Power-Tools haben können. Da die untersuchten Faktoren die Beanspruchung der untersuchten Power-Tools beeinflussen können, sollten diese in Prüfstandversuchen, die äquivalente Beanspruchungen hervorrufen sollen, berücksichtigt werden. Modelle, welche die passiven Anwendereigenschaften in virtuellen und physischen Validierungsumgebungen repräsentieren, sollten demnach ebenfalls hinsichtlich der untersuchten Faktoren einstellbar sein.

Zusammenfassend für Kapitel 5 dieser Arbeit lässt sich bezüglich der ersten Forschungsfrage somit feststellen:

Forschungsfrage 1: Einfluss der passiven Anwendereigenschaften

Haben die passiven Anwendereigenschaften, welche sich durch Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders verändern, einen Einfluss auf einen untersuchten Bohrhämmer und Impulsschrauber in manuellen Tests während der Hauptfunktionserfüllung und können diese zu veränderten Beanspruchungen führen?

Die passiven Anwendereigenschaften, die sich durch Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders verändern lassen, haben einen Einfluss auf das grundlegende Bewegungsverhalten in manuellen Tests der hier untersuchten Power-Tools: Bohrhämmer und Impulsschrauber. Sie können somit, gemäß den in Abschnitt 5.1 formulierten Grundannahmen, auch die Beanspruchung der untersuchten Power-Tools ändern.

Abschließend wird das in diesem Kapitel erlangte Wissen über die Einflussstärken der untersuchten Parameter auf das Bewegungsverhalten der Power-Tools in Form eines qualitativen Überblicks in Tabelle 5-4 zusammengefasst. Die Einflussstärke der einzelnen Parameter wird hierbei durch folgende qualitative Kategorien und deren Zwischenstufen beschrieben: (++) starker gesicherter Einfluss, (+) schwacher aber gesicherter Einfluss und (0) kein bzw. kein feststellbarer Einfluss.

Tabelle 5-4: Qualitativer Überblick über die Einflussstärken der untersuchten Parameter auf das Bewegungsverhalten der Power-Tools

	Bohrhammer	Impulsschrauber
Haltung	++	++
Andruckkraft	++	+
Greifkraft	0 / +	++
anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution	++	+

6 Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschrauber

In Kapitel 5 dieser Arbeit wurde festgestellt, dass variierende passive Anwendereigenschaften einen Einfluss auf das grundlegende Bewegungsverhalten des Impulsschraubers im manuellen Test während der Hauptfunktionserfüllung haben. Innerhalb dieses Kapitels 6 steht darauf aufbauend die Forschungsfrage im Fokus, in welcher Weise sich die passiven Anwendereigenschaften bei gleicher Anregung durch die Armhaltung, Greifkraft, Andruckkraft und die anthropometrischen Charakteristiken und Konstitution - also die Variation des Anwenders – am Impulsschrauber verändern lassen. Des Weiteren wird untersucht, ob offensichtliche Zusammenhänge zwischen der Variation der passiven Anwendereigenschaften und dem entstehenden grundlegenden Bewegungsverhalten des Power-Tools in manuellen Tests bestehen.

6.1 Theoretische Vorbetrachtung (Analysephase)

Im Stand der Forschung (vgl. Abschnitt 2.3.1) dieser Arbeit wurde bereits auf die Möglichkeit der Charakterisierung der passiven Anwendereigenschaften durch die Impedanz des Hand-Arm Systems eingegangen. Die Beziehungen zwischen der Impedanz und den Messgrößen wird hier zum Verständnis der Vorgehensweise erweitert dargestellt.

6.1.1 Mathematische Beziehungen zur Messung der passiven Anwendereigenschaften

Die mechanische Eingangsimpedanz $\underline{Z}(\omega)$ des Hand-Arm Systems wurde bereits im Stand der Forschung durch Gl. 2-1 und Gl. 2-2 definiert. Eingangsgrößen zur Errechnung der Impedanz sind die Kraft $\underline{F}(\omega)$, die Auslenkungsgeschwindigkeit $\underline{\dot{x}}(\omega)$ oder die Auslenkungsbeschleunigung $\underline{\ddot{x}}(\omega)$ jeweils in Abhängigkeit zur Kreisfrequenz der Schwingung ω . Die messtechnische Erfassung der komplexen Größen geschieht im Stand der Forschung meist durch einen Spektralanalysator. Innerhalb dieser Arbeit steht die Analyse bei der Hauptfrequenz des Impulsschraubers im Fokus. Die Auswertung über einen Spektralanalysator ist hier nicht zielführend, da keine breiten Frequenzbänder zur Verfügung stehen. Stattdessen werden die komplexen Größen über die maximalen Schwingungsamplituden \hat{F} , \hat{x} bzw. $\hat{\dot{x}}$ und den Nullphasenwinkel des Signales φ_{0F} , $\varphi_{0\dot{x}}$ bzw. $\varphi_{0\ddot{x}}$ definiert. Die Größen $\underline{F}(\omega, t)$, $\underline{\dot{x}}(\omega, t)$ und $\underline{\ddot{x}}(\omega, t)$ lassen sich dann wie folgt schreiben:

$$\underline{F}(\omega, t) = \hat{F} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_{0F})}; \quad \underline{\dot{x}}(\omega, t) = \hat{\dot{x}} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_{0\dot{x}})}; \quad \text{Gl. 6-1}$$

$$\underline{\ddot{x}}(\omega, t) = \hat{\ddot{x}} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_{0\ddot{x}})}$$

Unter der Voraussetzung, dass Kraft und Bewegung bei gleicher Frequenz schwingen (dies ist bei den hier durchgeführten eingeschwungenen Messungen der Fall), lassen sich die Impedanz $\underline{Z}(\omega)$ und die scheinbare Masse $\underline{M}(\omega)$ mit Gl. 2-1 und Gl. 6-1 ausdrücken als:

$$\underline{Z}(\omega) = \frac{\hat{F} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_{0F})}}{\hat{\dot{x}} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_{0\dot{x}})}} = \frac{\hat{F}}{\hat{\dot{x}}} e^{j(\varphi_{0F} - \varphi_{0\dot{x}})}; \quad \underline{M}(\omega) = \frac{\hat{F}}{\hat{\ddot{x}}} e^{j(\varphi_{0F} - \varphi_{0\ddot{x}})} \quad \text{Gl. 6-2}$$

Messsysteme zur Erfassung der beschriebenen Größen weisen hierbei den in Bild 6-1 dargestellten grundlegenden Aufbau auf.

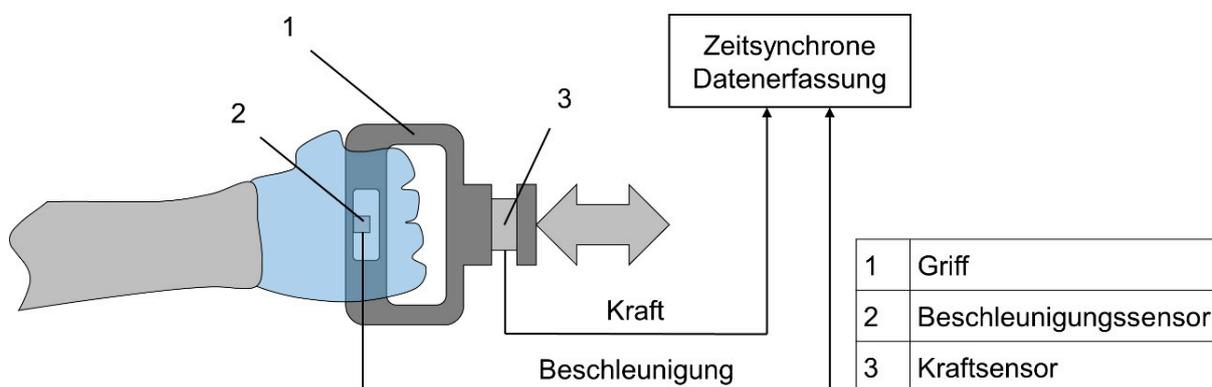


Bild 6-1: Grundlegender Aufbau eines Messsystems zur Erfassung der Impedanz des Hand-Arm Systems

Ein Griff (1) wird durch einen Schwingungsanreger mit einer Bewegung (meist sinusförmiger Sweep, zum Teil aber auch weißes Rauschen) beaufschlagt. Der zu untersuchende Proband greift an diesem Griff an. Möglichst nahe bei der Hand oder im Griff selbst werden die Griffbewegungen durch einen Beschleunigungssensor (2) erfasst. Die entstehende Kraft, die zu dieser Bewegung notwendig ist, wird zeitsynchron zum Beschleunigungssignal durch einen Kraftsensor (3) aufgezeichnet. Allen Messsystemen, die diesem Aufbau folgen, ist eigen, dass neben der Impedanz des Hand-Arm Systems immer eine sogenannte Leerimpedanz des Messaufbaus überlagert mitgemessen wird. Diese Leerimpedanz resultiert im Betrag beispielsweise aus der Masse des Griffes oder den Massen der Sensoren und in der Phase aus den Steifigkeiten des Messsystems oder den Signallaufzeiten durch die Verstärker. Zur Messung der Impedanz des Hand-Arm Systems ist es somit notwendig, diese

Leerimpedanz von der gemessenen Impedanz zu subtrahieren. Nach DONG ET AL.¹⁸⁴ gilt somit Gl. 6-3:

$$\underline{Z}_{Hand}(\omega) = \underline{Z}_{Total}(\omega) - \underline{Z}_{Leer}(\omega) \quad \text{Gl. 6-3}$$

Betrag $|\underline{Z}_{Hand}(\omega)|$ und Phase $\angle \underline{Z}_{Hand}(\omega)$ der Hand-Arm System Impedanz ergibt sich dann aus dem Realteil \Re und dem Imaginärteil \Im von $\underline{Z}_{Hand}(\omega)$ nach Gl. 2-4 und Gl. 2-5.

6.1.2 Anforderungen an eine Methode zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Griff eines Impulsschraubers

Um zu klären, wie stark sich die passiven Anwendereigenschaften durch die Armhaltung, Greifkraft, Andruckkraft und die anthropometrischen Charakteristiken und Konstitution - also die Variation des Anwenders - am Impulsschrauber verändern lassen, ist eine Methode notwendig, mit der die Impedanz des Hand-Arm Systems durch Messung der Kraft und Beschleunigung am Krafteinleitungspunkt erfasst werden kann.

Aus den durchgeführten Versuchen in Kapitel 5 lässt sich mit Hilfe des Beschleunigungssensors (vgl. Bild 6-2) das Frequenzspektrum der Anregung für ein beispielhaftes Szenario bestimmen.

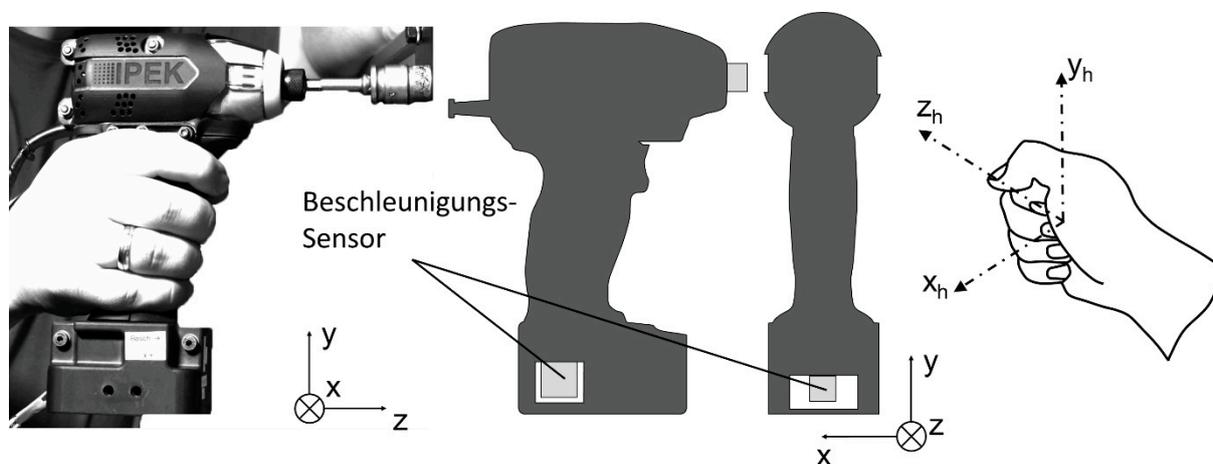


Bild 6-2: Position des Beschleunigungssensors und verwendetes Koordinatensystem

In Bild 6-3 ist das Frequenzspektrum des Beschleunigungssignales in den drei Raumrichtungen über der Frequenz von 5 - 100 Hz aufgetragen. Die Raumrichtungen in Bild 6-2 entsprechen hierbei den Richtungsbezeichnungen für die Hand-Arm System Impedanz in ISO 10068:2012-12 (vgl. Bild 6-2 rechts). Die Beschleunigung in x-Richtung ist gegenüber den beiden anderen Raumrichtungen sehr dominant.

¹⁸⁴ Dong et al. 2006b, S. 810

Deutlich ist die Hauptgerätefrequenz von ca. 23 Hz in x-Richtung zu erkennen, während in y-Richtung und z-Richtung kaum Beschleunigungen bei dieser Frequenz aufgezeichnet werden. Bedingt durch das Funktionsprinzip des Schraubers und aufgrund der Messwerte lässt sich somit feststellen, dass die Schraubachse einen Drehpunkt darstellt, um den sich das Gerät und somit der Griff dreht. Zusätzlich treten deutliche Oberschwingungen - also die ganzzahligen Mehrfachen der Anregungsfrequenz - in x-Richtung auf. In y-Richtung (entlang des Griffes) treten nur sehr schwache Grundschwingungen und Oberschwingungen auf. In z-Richtung (zweite Querrichtung des Griffes bzw. in Richtung der Unterarmachse) treten hingegen deutliche Oberschwingungen und nur eine sehr schwache Grundschwingung auf. Die Oberschwingungen liegen somit ausgeprägt in x- und z-Richtung vor, die Grundschwingung deutlich nur in x-Richtung. Der Griff ist somit als um die Schraubachse mit der Gerätehauptfrequenz schwingender Stab zu betrachten, der Oberschwingungen in beiden Quer-Richtungen (Kontinuums-Schwingungen) aber kaum in Längs-Richtung aufweist.

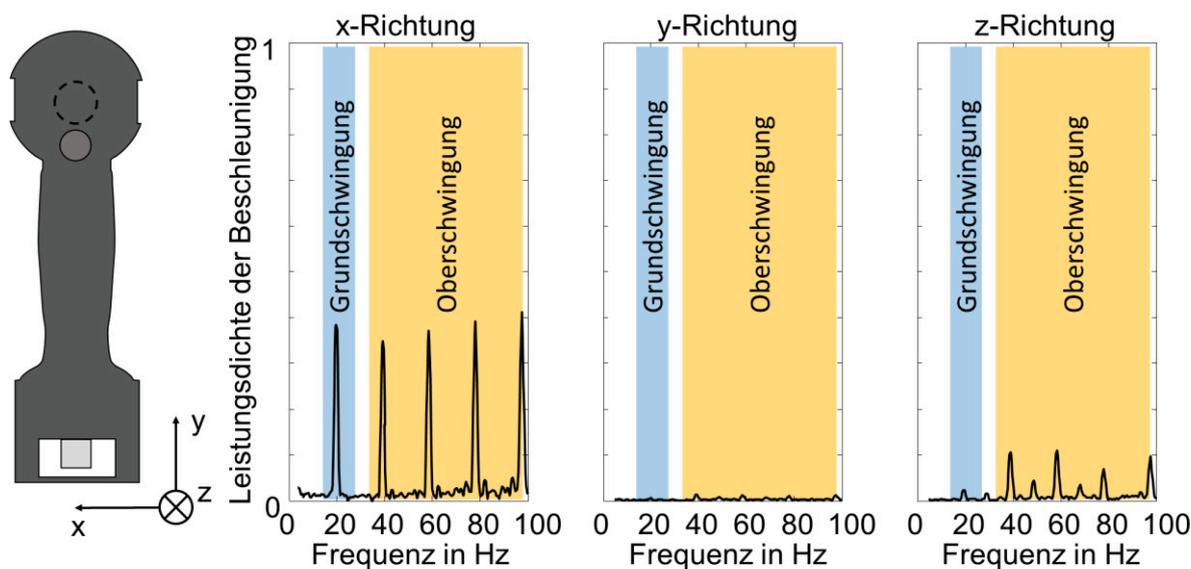


Bild 6-3: Frequenzspektrum der Anregung für ein beispielhaftes untersuchtes Szenario in drei Raumrichtungen am Impulsschrauber

Sofern nicht die Gehäusestruktur selbst im Fokus der Untersuchung steht, sind die Oberschwingungen des Impulsschrauber-Griffes für das grundlegende Bewegungsverhalten unerheblich, da sie auf das Gehäuse beschränkt sind. Die Oberschwingungen werden zwar eventuell durch die passiven Anwendereigenschaften beeinflusst, liegen aber nicht im Fokus dieser Arbeit, da das grundlegende Bewegungsverhalten untersucht wird (vgl. auch Abschnitt 5.1).

Im Rahmen dieser Arbeit sind somit die passiven Anwendereigenschaften bei der Impulsschrauber-Hauptfrequenz (ca. 23 Hz) in der aus der Drehung um die

Schraubachse resultierenden x-Richtung von Interesse. Die prinzipielle Struktur eines solchen Messsystems, das Teil der Methode zur Erfassung der passiven Anwendereigenschaften ist, ist in Bild 6-4 dargestellt.

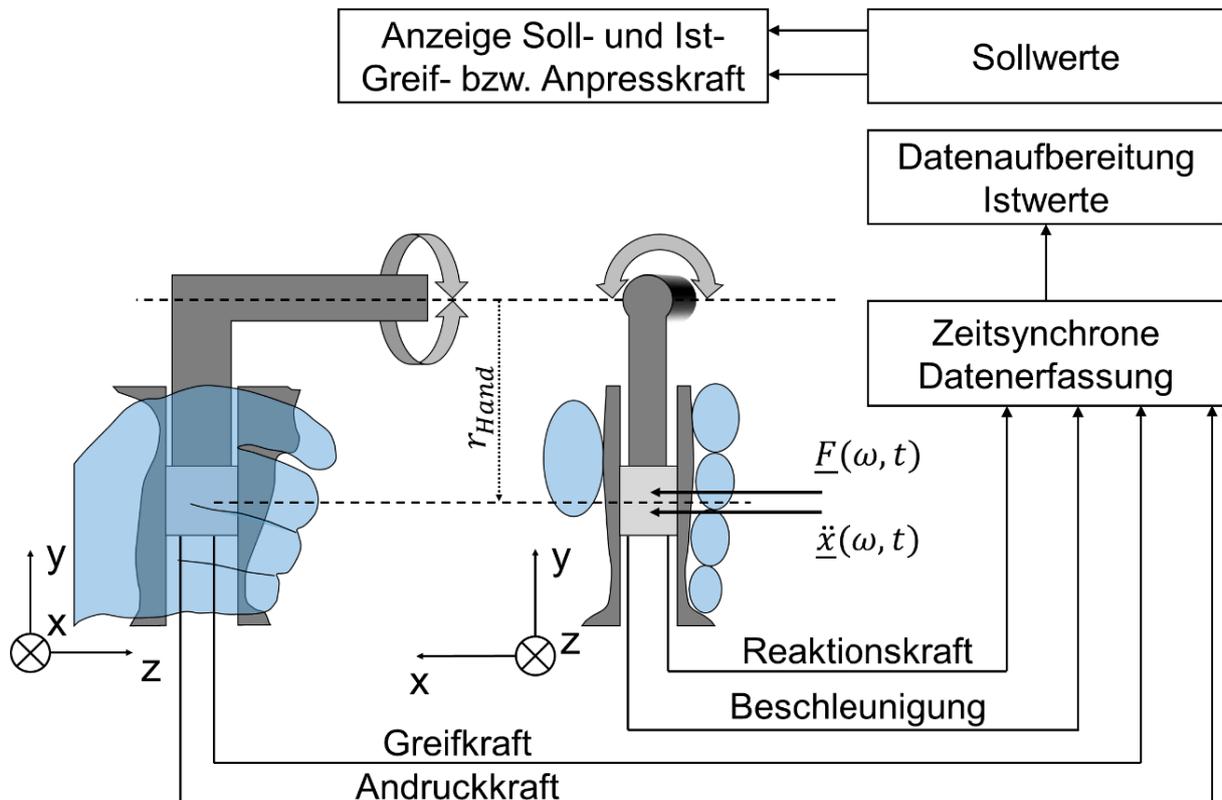


Bild 6-4: Prinzipielle Struktur eines Messsystems zur Erfassung der passiven Anwendereigenschaften im Rahmen dieser Arbeit

Das Messsystem muss eine zeitsynchrone Erfassung der Beschleunigung und der resultierenden Kraft zwischen Griff und Hand in einer durch eine Drehung hervorgerufenen Bewegung (ISO 10068:2012-12 x_h -Richtung) nahe des Handmittelpunktes (im Abstand r_{Hand} zur Drehachse) ermöglichen. Zeitgleich müssen Greif- und Andruckkraft des Anwenders erfasst werden, um ihm diese während der Messung kontinuierlich im Vergleich zu den Zielwerten darstellen zu können. Eine Veränderung der Armhaltung des Anwenders muss hierbei realisierbar sein.

6.2 Zwischenfazit zur theoretischen Vorbetrachtung für die Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschrauber

Bezüglich der ersten Unterfrage der zweiten Forschungsfrage lässt sich zusammenfassend für Abschnitt 6.1 feststellen:

Forschungsfrage 2: Untersuchung der veränderlichen passiven Anwendereigenschaften am Griff eines Impulsschraubers

Welche Anforderungen stellen sich an eine Methode zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Griff eines Impulsschraubers?

Basierend auf der theoretischen Analyse muss die Methode eine Erfassung der Beschleunigung und der resultierenden Kraft zwischen Griff und Hand in durch eine Drehung hervorgerufene Bewegung (ISO 10068:2012-12 x_h -Richtung) nahe des Handmittelpunktes ermöglichen. Die interessierende Frequenz der Drehbewegung liegt hierbei bei ca. 23 Hz. Der Griff ist in einer zum Gerätegriff vergleichbaren Außenkontur zu realisieren. Eine Untersuchung des Anwenders in zur realen Anwendung vergleichbaren Haltungen steht hierbei im Fokus. Die gleichzeitige Einstellbarkeit der Greif- und Andruckkraft des Anwenders als Einflussfaktor auf die passiven Anwendereigenschaften ist hierbei unabdingbar.

Auf Basis dieser Anforderungen wird im anschließenden Abschnitt 6.3 eine Methode zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Griff eines Impulsschraubers entwickelt.

6.3 Untersuchung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften bei der Nutzung eines Impulsschraubers (Methodenentwicklungsphase)

Zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschraubegriff ist eine Untersuchung am unveränderten Power-Tool in der realen Anwendung das anzustrebende Ziel. Im Stand der Forschung sind bislang keine Messsysteme für Power-Tools bekannt, mit denen die summierte Kraft zwischen Griff und Hand bei hohen Frequenzen auflösbar sind. Kapazitive und resistive Messfolien zwischen Hand und Griff sind zum einen in der Abtastrate beschränkt und zum anderen werden zur Oberfläche tangentielle Kraftanteile nicht erfasst. Dies würde zwangsläufig zu einer fehlerhaften Messung der passiven Anwendereigenschaften führen. Weiter soll das Messsystem, zumindest bis zur untersuchten Frequenz, in Anlehnung an DIN EN ISO

10819:2013-12, keine Eigenfrequenzen aufweisen. Es muss also ausreichend steif oder sehr leicht sein. Dies ist mit relativ lose aufgebrachten Folien ebenfalls nicht zu erreichen. In Konsequenz ist ein steifes Messelement am oder im Schrauber selbst zu integrieren, welches die Kraft zwischen Anwender und Griff erfassen kann. Für die Erfassung von dynamischen Kräften bei hoher Steifigkeit bieten sich hierbei piezoelektrische Kraftsensoren an. Mit dem in Abschnitt 5.6 vorgestellten Messgriff für einen Impulsschrauber liegt somit bereits ein prinzipiell geeignetes Messsystem zur Datenerfassung vor.

6.3.1 Modifikationen am Impulsschrauber-Messgriff zur Untersuchung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften

Der in Abschnitt 5.6 vorgestellte Messgriff bietet bereits die Möglichkeit, die Reaktionskraft zwischen Hand und Griff, welche aus der Drehbewegung des Griffes resultiert, durch ein Piezo-drei-Achs-Kraft-Sensorelement Kistler 9251A (Pos. 7 in Bild 6-5) zu erfassen.

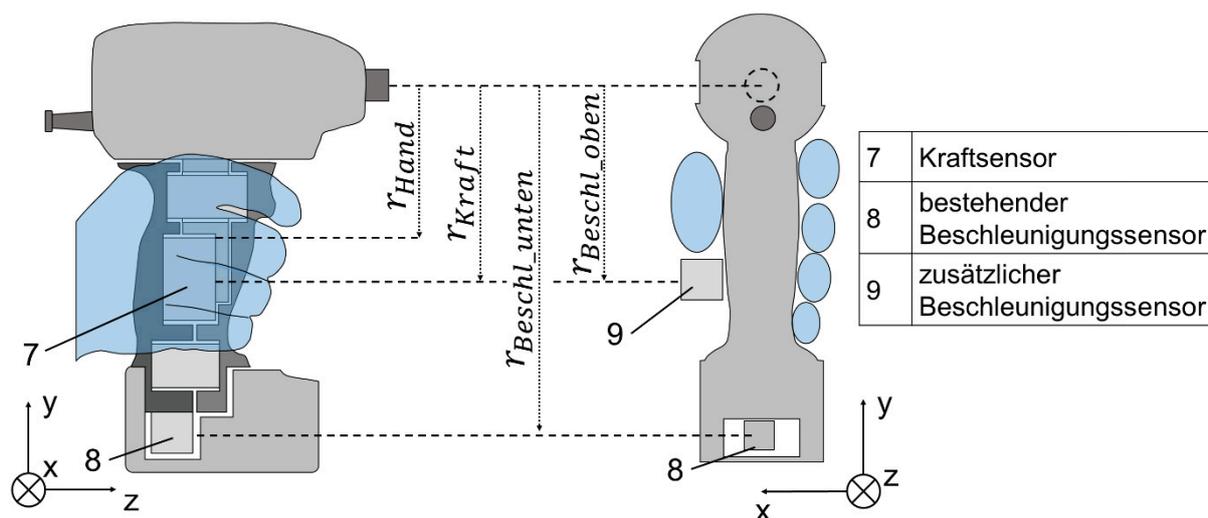


Bild 6-5: Hebelverhältnisse der Sensoren und des Handmittelpunktes am modifizierten Impulsschrauber

Der Mittelpunkt des Kraftsensors liegt um den Radius $r_{Kraft} = 93 \text{ mm}$ von der Rotationsachse des Schraubers versetzt. Eine von ZUMSTEIN¹⁸⁵ durchgeführte Studie bestimmt den mittleren Abstand des Handmittelpunktes bei Pistolengriff-Schraubern unter Verwendung der DIN 33402-2:2005-12 auf 78-83 mm. Die Studie legt den Handmittelpunkt bei dem hier verwendeten Schrauber auf $r_{Hand} = 83 \text{ mm}$ fest. Der Mittelpunkt des Kraftsensors liegt somit direkt neben dem Handmittelpunkt und ist somit prinzipiell geeignet, die entsprechende Kraft nahe der Einleitungsstelle zu erfassen.

¹⁸⁵ vgl. Zumstein 2016 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

Die Bewegung des Griffes lässt sich ohne Modifikation nur durch den drei-Achs Beschleunigungssensor PCB 356A02 (vgl. Pos. 8 in Bild 5-17 bzw. Bild 6-5) erfassen. Dieser ist für die Messaufgabe der Erfassung der Gerätehauptbewegung in Abschnitt 5.4 gut geeignet. Im Kontext der Erfassung der passiven Anwendereigenschaften besteht jedoch der Nachteil der entfernten Position zum Kraftsensorelement $r_{\text{Beschl_unten}} = 173 \text{ mm}$. Hierdurch ergibt sich durch die Elastizitäten im Griff ein unerwünschter Phasenversatz zwischen Kraft und Beschleunigungssignal, der rechnerisch nicht kompensiert werden kann. Um den Phasenversatz zu minimieren, muss die Beschleunigung möglichst nahe am Kraftsensor erfasst werden. Hierfür wird an der nicht umgriffenen Seite des Griffes ein zusätzlicher Beschleunigungssensor PCB 356A02 mit Hilfe einer Mounting Plate in einem zum Kraftsensor gleichen Radius auf dem Griff seitlich aufgebracht (vgl. Pos. 9 in Bild 6-5).

6.3.2 Anzeige der Soll- und Istwerte der Andruck- bzw. Greifkraft für den Probanden und Kontrolle der Armhaltung

Um den Einfluss der Armhaltung, der Greifkraft und der Andruckkraft auf die passiven Anwendereigenschaften zu untersuchen, müssen diese Eigenschaften, wie auch in Kapitel 5, einstellbar sein. Die entwickelten Methoden aus Abschnitt 5.6.2 und Abschnitt 5.6.3 haben sich als geeignet erwiesen, um diese drei Faktoren bei der Untersuchung am Impulsschrauber einzustellen. Die vorgestellten Methoden aus Abschnitt 5.6.2 und Abschnitt 5.6.3 werden deshalb unverändert übernommen.

6.3.3 Anwendungsmodell für die Versuche

Um eine Untersuchung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften mittels Impulsschrauber-Messgriff zu ermöglichen, muss die Anwendung durch eine Modellanwendung während der Versuche abgebildet werden. Hierbei ist auszuschließen, dass das Werkstückmodell selbst einen Einfluss auf die gemessenen passiven Anwendereigenschaften hat. In Abschnitt 5.7.2 konnte festgestellt werden, dass der modellierte Schraubenverbund einen Einfluss auf die erzeugte Vorspannkraft hat (vgl. Bild 5-24) und sich beispielsweise bezüglich seiner Drehsteifigkeit über die Versuche verändert. Eine Rückwirkung auf die gemessene Impedanz kann dabei nicht ausgeschlossen werden. Ein Nachweis der Rückwirkungsfreiheit wäre nur möglich, wenn ein mechanisches Ersatzsystem bestehen würde, welches beim Anziehen der Schraubenverbindung mit immer gleicher Impedanz mit dem Schrauber wechselwirkt¹⁸⁶. Diese könnte dann zur Kalibrierung bestimmt werden. Ein solches

¹⁸⁶ Anmerkung: Eine reine physische Masse am Griff, welche der Drehung entgegenwirkt und ein Anziehen der Schraube ermöglicht, ist in diesem Fall nicht realisierbar. Der Schrauber müsste sonst wechselwirkungsfrei im Raum gehalten werden.

System wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch erst entwickelt. Innerhalb dieser Versuche wird die Abtriebswelle des Schraubers deshalb starr mit der Umgebung gekoppelt (vgl. Bild 6-6). Das Anwendungsmodell entspricht somit einer festgezogenen Schraube ohne Spiel zwischen Schrauber-Nuss und Schrauben-Kopf.

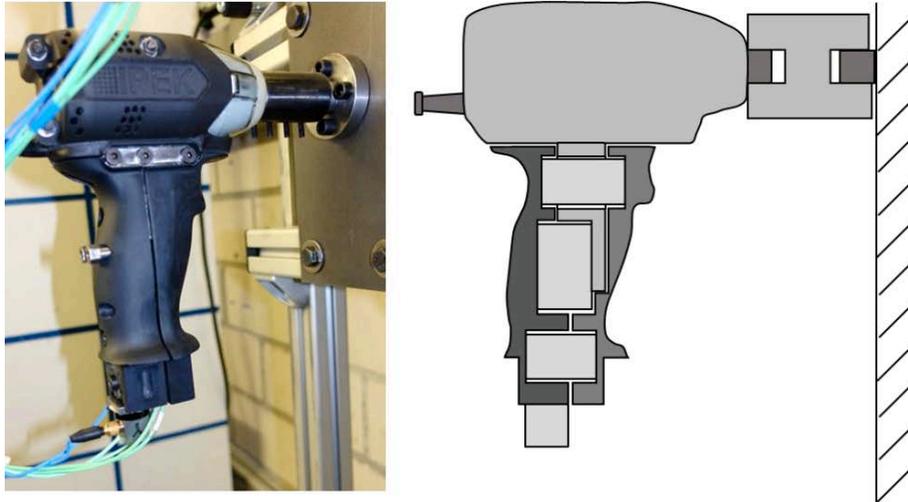


Bild 6-6: Versuchsaufbau mit vereinfachtem Werkstückmodell (festgezogene Schraube ohne Spiel) zur Untersuchung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften

6.3.4 Messkette und Datenerfassung

Die in Bild 6-7 dargestellte Messkette entspricht der in Abschnitt 5.6.5 vorgestellten Messkette. Die Abtastrate beträgt 20 kHz.

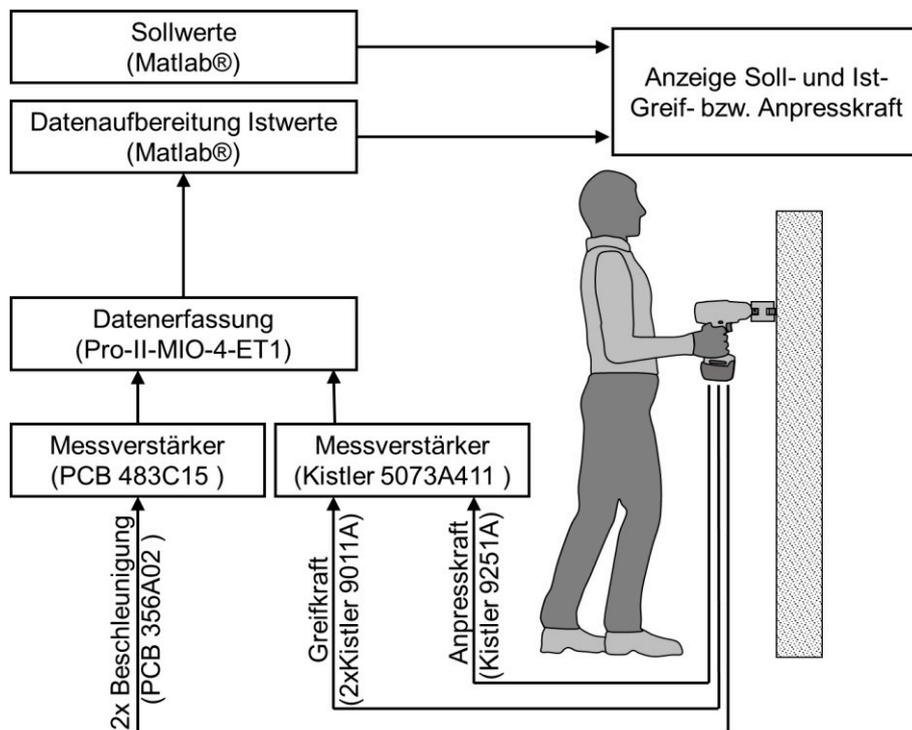


Bild 6-7: Messkette zur Untersuchung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften

6.3.5 Aufbereitung der Messdaten und Berechnung der Impedanz

Wie in Abschnitt 6.1.1 vorgestellt, werden die passiven Anwendereigenschaften durch die Impedanz des Anwenders an der Einleitungsstelle der Hand (Hand-Arm System Impedanz) quantifiziert. Hierfür ist nach Gl. 6-2 die Erfassung der Kraftamplitude \hat{F} , der Beschleunigungsamplitude \hat{x} , des Nullphasenwinkels der Kraft φ_{0F} und des Nullphasenwinkels der Beschleunigung $\varphi_{0\ddot{x}}$ bei der Untersuchungskreisfrequenz ω nötig. In Abschnitt 6.1.2 wird die interessierende Frequenz hierbei auf die Impulsschrauber-Hauptfrequenz (ca. 23 Hz) festgelegt. Die Datenauswertung erfolgt hierbei über MATLAB®. Der Ablauf der Auswerteroutine ist in Bild 6-8 dargestellt.

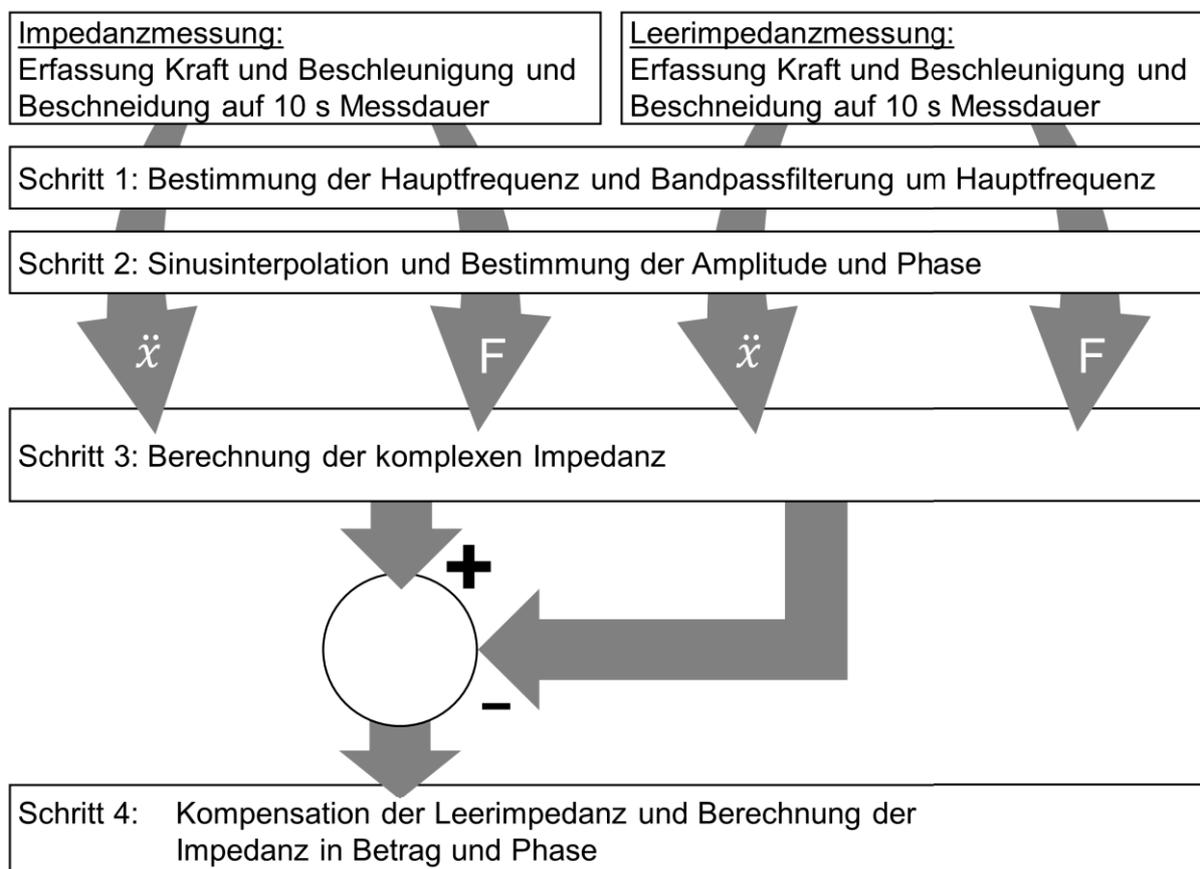


Bild 6-8: Ablauf der Auswerteroutine zur Bestimmung der Hand-Arm System Impedanz

Zur Bestimmung der Impedanz des Hand-Arm Systems sind, impliziert durch den Messaufbau, zwei Impedanzmessungen notwendig. In einer Leerimpedanzmessung (Bild 6-8 – rechte Hälfte) ist zunächst die Leerimpedanz des Messsystems ohne Hand-Arm System Impedanz zu bestimmen. In einer zweiten Messung, der eigentlichen Messung der Hand-Arm System Impedanz (Bild 6-8 – linke Hälfte), wird die Impedanz des Hand-Arm Systems inklusive der Leerimpedanz des Messsystems gemessen. Um die reine Hand-Arm System Impedanz zu bestimmen, ist die Leerimpedanz des Messsystems nach Gl. 6-3 zu eliminieren. In der Auswerteroutine werden hierfür, nach

der Beschneidung des Datenstroms auf eine Auswertedauer von 10 s, folgende Schritte für beide Messungen durchlaufen:

Schritt 1: Hauptfrequenz und Filterung

Die Hauptgerätefrequenz wird mittels einer Fourier-Transformation ermittelt. Hierbei wird der Suchbereich auf einen Wertebereich ± 5 Hz um die ungefähre Hauptfrequenz von 23 Hz (vgl. Abschnitt 6.1.2) eingegrenzt. Der Algorithmus findet hierbei die maximale Spitze des Amplitudenspektrums innerhalb des Suchbereiches und gibt die zugehörige Frequenz f_{Haupt} aus. Die Frequenzauflösung entspricht bei einer Abtastrate von 20 kHz und einer Auswertedauer von 10 s ungefähr 0,1 Hz. Die Kraft- und Beschleunigungsdaten werden im Anschluss durch einen Butterworth-Bandpassfilter (siehe Bild 6-9) analog zu Abschnitt 5.2 (insbesondere Bild 5-1) gefiltert.

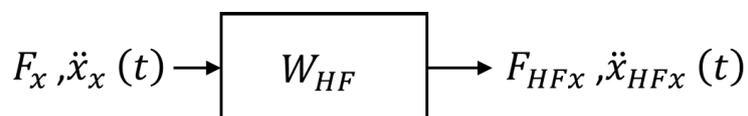


Bild 6-9: Filterung der Kraft- und Beschleunigungswerte

Die Filterparameter werden abweichend zu Abschnitt 5.2 für eine einfachere automatisierte Sinusinterpolation (vgl. Schritt 2) experimentell auf folgende Werte festgelegt:

$$f_{Grenz\ unten\ 3dB} = 0,95 \cdot f_{Haupt}; f_{Grenz\ oben\ 3dB} = 1,05 \cdot f_{Haupt}; 8. Ordnung$$

Da Einschwingzeiten des Filters zu erwarten sind und zeitgleich auch ein eingeschwungener Zustand des Hand-Arm Systems angestrebt wird, werden im Anschluss die ersten 5 s der Messdauer verworfen.

Schritt 2: Amplituden- und Phasenbestimmung durch Sinusinterpolation

Um Amplitude und Phase der Signale robust zu bestimmen, wird als Ansatz eine Sinusinterpolation der Signale gewählt. Bei 5 s Datenlänge ergeben sich bei einer Hauptgerätefrequenz von ca. 23 Hz, ca. 100 volle Perioden. Hierdurch ist eine sehr robuste Sinusinterpolation des Signals möglich. Die Kraftamplitude \hat{F} , die Beschleunigungsamplitude \hat{x} , der Nullphasenwinkel der Kraft φ_{0F} und der Nullphasenwinkel der Beschleunigung $\varphi_{0\ddot{x}}$ können direkt den Koeffizienten der beiden Interpolationen entnommen werden. Die Phasenlage von Kraft und Beschleunigung zueinander wird hierbei auf $\pm \pi$ durch Addition bzw. Subtraktion von 2π begrenzt.

Schritt 3: Berechnung der komplexen Impedanz

Während der Nullphasenwinkel der Signale durch die örtliche Nähe des oberen Beschleunigungssensors zum Kraftsensor (vgl. Abschnitt 6.3.1) bereits ausreichend genau bestimmt werden kann und direkt in Gl. 6-2 zu verwenden ist, ist eine Korrektur

der Amplituden zueinander notwendig, da die Messpunkte durch die Drehung unterschiedlich weit ausgelenkt werden.

Zur Korrektur der Amplituden wird das in Bild 6-10 dargestellte theoretische Starrkörpermodell des Schraubers verwendet. Das linke Teilbild entspricht hierbei dem gesamten Schrauber, das mittlere dem oberen Freischnitt durch den Kraftsensor und das rechte Teilbild dem unteren Freischnitt durch den Kraftsensor (Index F). m_1 entspricht der anteiligen Masse des Schraubers vor dem Kraftsensor, welche einen Schwerpunktabstand r_1 zum Drehpunkt des Schraubers besitzt. Für m_2 und r_2 gilt dies analog für den Masseanteil des Schraubers (inkl. einer evtl. Zusatzmasse) nach dem Kraftsensor. F_F und T_F bezeichnen die sich ergebenden Schnittkräfte und Schnittmomente im Kraftsensor. F_F entspricht hierbei der gemessenen Kraftamplitude im Kraftsensor und r_F dessen Abstand zum Drehpunkt. r_a bezeichnet den Abstand des Beschleunigungssensors (Index a) vom Drehpunkt. T_Z und F_x entsprechen den Auflagerreaktionen bzw. dem abgegebenen Drehmoment.

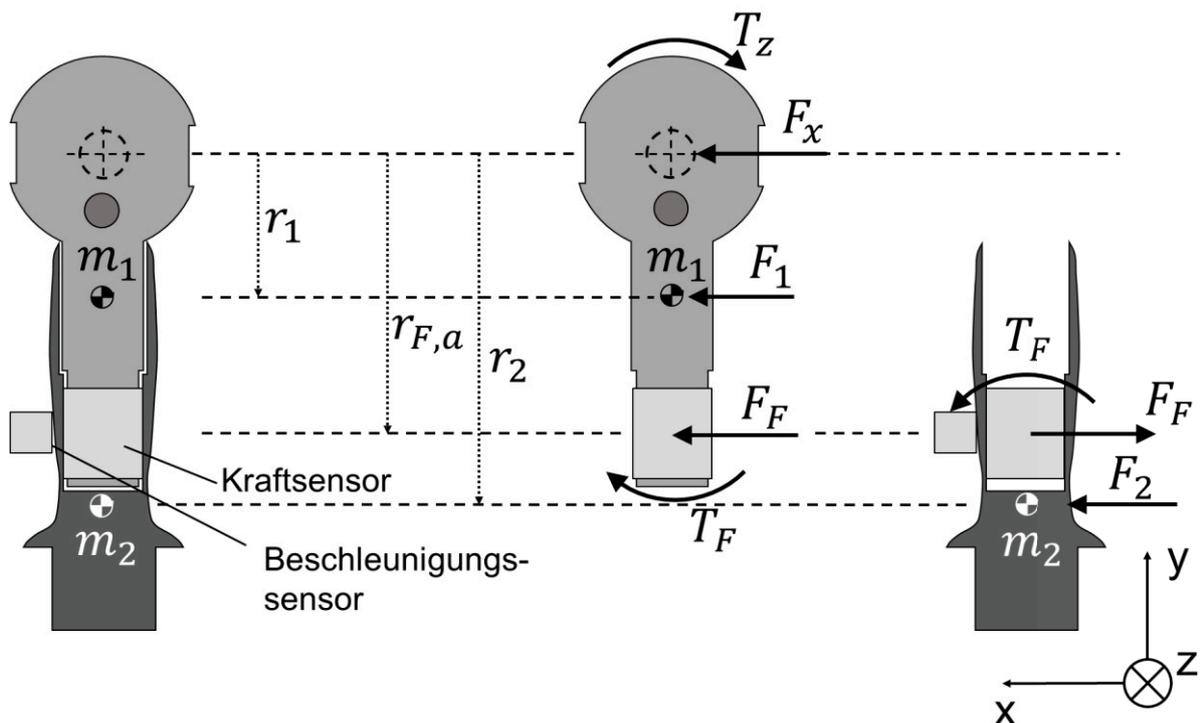


Bild 6-10: Starrkörpermodell zur Korrektur der gemessenen Kraft und der Beschleunigungsamplituden

Das Momenten-Gleichgewicht um den Drehpunkt des Schraubers ergibt sich für den oberen Freischnitt (mittleres Teilbild) zu:

$$0 = T_Z + F_1 \cdot r_1 + F_F \cdot r_{F,a} + T_F \quad \text{Gl. 6-4}$$

Für den unteren Freischnitt ergibt sich um den Massenschwerpunkt von m_2 folgendes Momenten-Gleichgewicht:

$$0 = -T_F + F_F \cdot (r_2 - r_{F,a}) \quad \text{Gl. 6-5}$$

Gl. 6-5 in Gl. 6-4 ergibt direkt:

$$0 = T_Z + F_1 \cdot r_1 + F_F \cdot r_2 \quad \text{Gl. 6-6}$$

Das Momenten-Gleichgewicht um den Drehpunkt am nicht geschnittenen Schrauber ergibt sich zu:

$$0 = T_Z + F_1 \cdot r_1 + F_2 \cdot r_2 \quad \text{Gl. 6-7}$$

Aus dem Koeffizientenvergleich von Gl. 6-6 und Gl. 6-7 folgt mit dem zweiten Newtonschen Gesetz:

$$F_F = F_2 = m_2 \cdot \ddot{x}_2 \quad \text{Gl. 6-8}$$

Unter Annahme einer reinen Starrkörperbewegung besteht die Möglichkeit, die gemessene Beschleunigung des Beschleunigungssensors über die Winkelbeschleunigung α um die Drehachse in den gesuchten Schwerpunkt zu verschieben. Es gilt:

$$\alpha = \frac{\ddot{x}_a}{r_{F,a}} = \frac{\ddot{x}_2}{r_2} \quad \text{Gl. 6-9}$$

Somit ergibt sich:

$$\frac{F_2}{\ddot{x}_2} = \frac{F_F}{\ddot{x}_a} \cdot \frac{r_{F,a}}{r_2} = m_2 \quad \text{Gl. 6-10}$$

Da die Amplituden der gemessenen Signale nicht vom Phasenversatz der Signale abhängen, lässt sich auf Basis von Gl. 2-2 und Gl. 6-2 mit Hilfe des Starrkörpermodells die scheinbare Masse $\underline{M}(\omega)$ und daraus die Impedanz $\underline{Z}(\omega)$ des Griffanteiles nach dem Kraftsensor inklusive eventueller Zusatzmassen auf diesem Griff ableiten zu:

$$\underline{M}_2(\omega) = \frac{\hat{F}_F}{\hat{\ddot{x}}_a} \cdot \frac{r_{F,a}}{r_2} e^{j(\varphi_{0F} - \varphi_{0\ddot{x}})}; \quad \underline{Z}_2(\omega) = \underline{M}_2(\omega) \cdot j \cdot \omega \quad \text{Gl. 6-11}$$

Schritt 4: Kompensation der Leerimpedanz und Berechnung von Betrag und Phase der Impedanz

Nach Gl. 6-3 kann die Impedanz des Hand-Arm Systems durch die Messung der Impedanz des Hand-Arm Systems mit Griff abzüglich der Impedanz des Griffes aus einer Leerimpedanzmessung errechnet werden.

Aus Gl. 6-11 ist ersichtlich, dass die Impedanz innerhalb des zur Verfügung stehenden Messaufbaus nur unter der Angabe des Angriffspunktes r_2 (bzw. des Schwerpunktes) berechnet werden kann. Dies gilt auch für die Leerimpedanz des Griffes. Die

Ermittlung des Masseschwerpunktes des eigentlichen Griffes ist über das CAD System prinzipiell möglich, jedoch lässt sich der Masseschwerpunkt r_2 auch durch folgende theoretische Überlegung anhand des vorher aufgebauten Starrkörpermodells eliminieren.

Im Falle einer Leerimpedanzmessung des Messsystems (vgl. Bild 6-8), also einer Messung ohne zusätzliche Masse auf dem Griff, entspricht $m_{2,Leer}$ der reinen Masse des Schrauber-Griffes nach dem Kraftsensor. $r_{2,Leer}$ entspricht dem Schwerpunkt dieser Masse gegenüber dem Rotationspunkt. Beim Hinzufügen einer Masse in einer zweiten Messung (Gedankenmodell für die Masse der Hand in der Impedanzmessung am Anwender) kommt zu $m_{2,Leer}$ die Masse $m_{2,Zusatz}$ hinzu, welche den Schwerpunktabstand $r_{2,Zusatz}$ gegenüber dem Rotationspunkt hat. $m_{2,Total}$ entspricht hierbei der Summe der beiden Massen und $r_{2,Total}$ dem Schwerpunkt dieser kombinierten Masse gegenüber dem Rotationspunkt. Für eine Messung mit einer solchen Zusatzmasse folgt:

$$\frac{F_{F,Total}}{\ddot{x}_{a,Total}} = m_{2,Total} \cdot \frac{r_{2,Total}}{r_{F,a}} \quad \text{Gl. 6-12}$$

Wobei $r_{2,Total}$ auch beschrieben werden kann durch:

$$r_{2,Total} = \frac{r_{2,Leer} \cdot m_{2,Leer} + r_{2,Zusatz} \cdot m_{2,Zusatz}}{(m_{2,Leer} + m_{2,Zusatz})} \quad \text{Gl. 6-13}$$

Womit mit Gl. 6-12 und Gl. 6-13 gilt:

$$\frac{F_{F,Total}}{\ddot{x}_{a,Total}} = (m_{2,Leer} + m_{2,Zusatz}) \cdot \frac{\frac{r_{2,Leer} \cdot m_{2,Leer} + r_{2,Zusatz} \cdot m_{2,Zusatz}}{(m_{2,Leer} + m_{2,Zusatz})}}{r_{F,a}} \quad \text{Gl. 6-14}$$

Und somit:

$$\frac{F_{F,Total}}{\ddot{x}_{a,Total}} = \frac{r_{2,Leer} \cdot m_{2,Leer}}{r_{F,a}} + \frac{r_{2,Zusatz} \cdot m_{2,Zusatz}}{r_{F,a}} \quad \text{Gl. 6-15}$$

Eine Leerimpedanzmessung liefert:

$$\frac{F_{F,Leer}}{\ddot{x}_{a,Leer}} = \frac{r_{2,Leer} \cdot m_{2,Leer}}{r_{F,a}} \quad \text{Gl. 6-16}$$

Womit geschrieben werden kann:

$$\frac{F_{F,Total}}{\ddot{x}_{a,Total}} = \frac{F_{F,Leer}}{\ddot{x}_{a,Leer}} + \frac{r_{2,Zusatz} \cdot m_{2,Zusatz}}{r_{F,a}} \quad \text{Gl. 6-17}$$

Damit folgt direkt:

$$m_{2,Zusatz} = \frac{F_{F,Total}}{\ddot{x}_{a,Total}} \cdot \frac{r_{F,a}}{r_{2,Zusatz}} - \frac{F_{F,Leer}}{\ddot{x}_{a,Leer}} \cdot \frac{r_{F,a}}{r_{2,Zusatz}} \quad \text{Gl. 6-18}$$

Der Rechenweg gilt äquivalent, wenn die Masse m_2 durch die scheinbare Masse $\underline{M}_2(\omega)$ nach Gl. 6-11 ersetzt wird. Es ergibt sich somit:

$$\begin{aligned} \underline{M}_{Zusatz}(\omega) &= \frac{\hat{F}_{F,Total}}{\hat{\ddot{x}}_{a,Total}} \cdot e^{j(\varphi_{0F}-\varphi_{0\ddot{x}})_{Total}} \cdot \frac{r_{F,a}}{r_{Zusatz}} \\ &- \frac{\hat{F}_{F,Leer}}{\hat{\ddot{x}}_{a,Leer}} \cdot e^{j(\varphi_{0F}-\varphi_{0\ddot{x}})_{Leer}} \cdot \frac{r_{F,a}}{r_{Zusatz}} \end{aligned} \quad \text{Gl. 6-19}$$

Im hier vorliegenden Fall der Bestimmung der Hand-Arm System Impedanz entspricht die zusätzliche scheinbare Masse der scheinbaren Masse des Hand-Arm Systems. Es folgt somit die abschließende Gleichung für die scheinbare Masse der Hand:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{Hand}(\omega) &= \underline{M}_{Hand}(\omega) \cdot j \cdot \omega \quad \text{mit} \quad \underline{M}_{Hand}(\omega) = \\ &\frac{\hat{F}_{F,Total}}{\hat{\ddot{x}}_{a,Total}} \cdot e^{j(\varphi_{0F}-\varphi_{0\ddot{x}})_{Total}} \frac{r_{F,a}}{r_{Hand}} - \frac{\hat{F}_{F,Leer}}{\hat{\ddot{x}}_{a,Leer}} \cdot e^{j(\varphi_{0F}-\varphi_{0\ddot{x}})_{Leer}} \frac{r_{F,a}}{r_{Hand}} \end{aligned} \quad \text{Gl. 6-20}$$

Betrag und Phase der Impedanz lassen sich mit Hilfe der Gl. 6-20 und Gl. 2-4 bzw. Gl. 2-5 direkt berechnen.

6.3.6 Verifikation des Messsystems und Methodenabsicherung

6.3.6.1 Theoretische Vorbetrachtung

Die in Abschnitt 6.3.5 hergeleiteten Beziehungen zur Bestimmung der passiven Anwendereigenschaften (Hand-Arm System Impedanz) basieren auf einigen Annahmen und Vereinfachungen. So wird der Griff in erster Näherung als Starrkörper betrachtet, um von Beschleunigungssensordaten auf Beschleunigungen im Einleitungspunkt der Hand zu schließen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass sich die Leerimpedanz des Griffes bei der Impedanzmessung am Anwender nicht verändert. Zeitgleich werden zur Berechnung der Impedanz Auswerteroutinen in MATLAB® erstellt, welche einer Überprüfung bedürfen. Neben der Verifikation der Zulässigkeit der getroffenen Annahmen bedarf auch das Messsystem selbst einer

Verifikation, um eventuell entstehende unerwünschte Kraftbrücken innerhalb des Griffes auszuschließen.

Als Verifikationsmethode zur Absicherung der korrekten Impedanzmessung durch das Messsystem wird hierbei das im Anhang der ISO 10068:2012-12 vorgeschlagene Vorgehen der Verifikation mittels aufgebrachtener realer Massen und Vergleich mit den errechneten Massen gewählt. Abweichend zu dem vorgeschlagenen Vorgehen (Nutzung sehr kleiner Gewichte) wird innerhalb dieser Arbeit jedoch ein größeres Spektrum an Gewichten genutzt. Hierdurch wird es möglich, eventuelle durch hohe Kräfte entstehende Kraftbrücken im Messgriff auszuschließen. Zunächst ist hierfür zu klären, in welchem Bereich der Gewichte eine Verifikation sinnvoll ist. Anhaltspunkte liefern die in der ISO 10068:2012-12 angegebenen Impedanz-Verläufe des Hand-Arm Systems. Die hier durch eine Drehung hervorgerufene Bewegung am Schraubgriff entspricht in erster Näherung einer rein translatorischen Anregung des Hand-Arm Systems in x_h -Richtung. Die Norm gibt für den interessierenden Frequenzbereich folgende Werte für den Betrag der Impedanz an:

Tabelle 6-1: Betrag der Impedanz in x_h -Richtung nach ISO 10068:2012-12

Frequenz	Untere Grenze	Durchschnitt	Obere Grenze
20 Hz	36 <i>Ns/m</i>	64 <i>Ns/m</i>	84 <i>Ns/m</i>
25 Hz	43 <i>Ns/m</i>	72 <i>Ns/m</i>	104 <i>Ns/m</i>

Mit Gl. 2-2 ergibt sich hieraus ein Wertebereich für den Betrag der scheinbaren Masse (\underline{M}) von 0,274 kg bis 0,668 kg. Für die Verifikation der gemessenen Impedanz-Beträge des Messsystems wird davon ausgegangen, dass bei einer ausreichend genauen Bestimmung einer realen Masse in diesem Wertebereich auch die Bestimmung der scheinbaren Masse im selben Wertebereich möglich sein wird, sofern die Phase durch das Messsystem korrekt erfasst werden kann. Dieses Vorgehen entspricht dem Vorschlag der ISO 10068:2012-12.

Das Aufbringen entsprechend großer Massen mit dem Schwerpunkt im Bereich des Handmittelpunktes am Griff ist aufgrund fehlender Anbindungsstrukturen und wegen der Griffkontur in diesem Bereich nicht möglich. Da der Impulsschrauber aber, wie in Abschnitt 6.1.2 gezeigt, eine reine Drehbewegung um den Drehpunkt des Schraubers (vgl. auch Bild 6-10) vollführt, können die aufzubringenden Massen in äquivalent wirkende Massenträgheitsmomente (J) umgerechnet werden, die ihren Schwerpunkt nicht im Handmittelpunkt ($r_{Hand} = 83mm$) haben müssen, aber zu diesem Punkt als Masse gleich wirken. Es muss hierbei zwischen der umgerechneten

Prüfzusatzmasse $m_{Prüf}$ und der real aufgetragenen Masse m_{Ersatz} mit deren Schwerpunkt r_{Ersatz} gelten:

$$J_{Prüf} = m_{Prüf} \cdot r_{Hand}^2 = m_{Ersatz} \cdot r_{Ersatz}^2 \quad \text{Gl. 6-21}$$

Tabelle 6-1 lässt sich mit Gl. 6-21 und der Beziehung zwischen scheinbarer Masse und Impedanz (Gl. 2-2) dann umschreiben zu:

Tabelle 6-2: Betrag zur in x_h -Richtung nach ISO 10068:2012-12 äquivalent wirkenden Massenträgheitsmoment (J)

Frequenz	Untere Grenze	Durchschnitt	Obere Grenze
20 Hz	$1,97 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$3,51 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$4,60 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$
25 Hz	$1,89 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$3,16 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$4,56 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$

Für die Verifikation der Gültigkeit der getroffenen Annahmen, des Messsystems, des Messgriffes und der Auswerterroutinen sind somit bekannte Massenträgheitsmomente von $1,89 - 4,60 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$ in unmittelbarer Nähe zum gedachten Handmittelpunkt ($r_{Hand} = 83\text{mm}$) am Gerätegriff anzubringen. Die mittels der beschriebenen Vorgehensweise gemessenen und errechneten Massenträgheitsmomente werden anschließend mit den bekannten realen Massenträgheitsmomenten verglichen.

6.3.6.2 Versuchsdesign

Als real aufgetragene Massenträgheitsmomente werden die in Tabelle 6-3 beschriebenen und in Bild 6-11 auszugsweise dargestellten Konfigurationen gewählt. Die Prüf-Massenträgheitsmomente sind hierbei im gesamten Wertebereich annähernd gleichverteilt.

Tabelle 6-3: Zur Verifikation genutzte Massenträgheitsmomente ($J_{Prüf}$)

Masse	Schwerpunkt	Massenträgheitsmoment
0,396 kg	0,069 m	$J_{Prüf,1} = 1,89 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$
0,483kg	0,073 m	$J_{Prüf,2} = 2,57 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$
0,565kg	0,076 m	$J_{Prüf,3} = 3,26 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$
0,650 kg	0,077 m	$J_{Prüf,4} = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$
0,737 kg	0,079 m	$J_{Prüf,5} = 4,60 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$



Bild 6-11: Verifikation des Messgriffes durch aufgebrachte Prüf-Massenträgheitsmomente.
 Links: Ohne Zusatzmasse; Mitte: 0,396 kg; Rechts: 0,737 kg

Aus den in Abschnitt 5.7.2 gewonnenen Erkenntnissen lässt sich ableiten, dass auch bei dem in Abschnitt 6.3.3 beschriebenen stark verkürzten Anwendungsmodell eine Abhängigkeit des Power-Tool Verhaltens und somit der Anregung vom internen Power-Tool Zustand (beispielsweise Erwärmung) und von der Akkuladung auftreten kann. Für die Versuche wird deshalb der Akku durch ein Netzgerät ersetzt. Die Power-Tool Temperatur wird mittels Messfühler an der Impulszelle überwacht. In Vorversuchen konnte festgestellt werden, dass ab einer gemessenen Temperatur von 60°C keine großen Schwankungen in der Anregungsfrequenz und Amplitude vorhanden sind. Die Temperatur wird somit zu Beginn und zum Ende einer jeden Messreihe protokolliert und sichergestellt, dass diese über 60°C liegt (erfahrungsgemäß steigt die Temperatur hierbei nicht über 75°C). Um weitere unbekannte Einflüsse sicher ausschließen zu können, wird, wie in Abschnitt 5.7.2, ein in Tabelle 6-4 dargestellter alternierender Versuchsplan genutzt. Die Versuchsreihen werden nacheinander durchgeführt. Um eine Langzeit-Drift auszuschließen, werden die Versuchsreihen mit $J_{Prüf,1}$ und $J_{Prüf,5}$ am Ende des gesamten Versuches doppelt ausgeführt.

Tabelle 6-4: Schema der 5 Versuchsreihen zur Verifikation des Messsystems und Methodenabsicherung

Massenträgheitsmomente ($\theta_{Prüf}$)	VNo. 0	VNo. 1	...	VNo. 9	VNo. 10
$J_{Prüf,1}$	Leerimpedanz	$J_{Prüf,1}$	...	$J_{Prüf,1}$	Leerimpedanz
$J_{Prüf,n}$	Leerimpedanz	$J_{Prüf,n}$	...	$J_{Prüf,n}$	Leerimpedanz
$J_{Prüf,1}$	Leerimpedanz	$J_{Prüf,1}$	...	$J_{Prüf,1}$	Leerimpedanz
$J_{Prüf,5}$	Leerimpedanz	$J_{Prüf,5}$	...	$J_{Prüf,5}$	Leerimpedanz

Für jeweils ein aufgebrachtes Prüf-Massenträgheitsmoment werden somit 11 Versuche durchgeführt. Davon sind 6 Versuche Leerimpedanz-Messungen und 5 Versuche Messungen mit aufgebrachtem Prüf-Massenträgheitsmoment jeweils alternierend direkt aufeinander folgend.

Für jeden einzelnen Versuch wird hierbei folgendes Versuchsvorgehen festgelegt:

- 1) Rücksetzen der Kraft-Sensorelemente auf Piezo-Basis
- 2) Aktivieren des Impulsschraubers und 5 s Abklingen der Anfangspendel-Bewegung
- 3) Beginn der Messung
- 4) Ende der Messung nach 10 s Messzeit

Die Bestimmung der gemessenen Impedanz erfolgt, wie in Abschnitt 6.3.5 beschrieben und um Gl. 6-21 ergänzt, mit $r_{a,F} = 93 \text{ mm}$ und r_{Hand} nach Tabelle 6-3 in Betrag und Phase jeweils im paarweisen Vergleich von Messung VNo. n und Messung der Leerimpedanz VNo. n-1 bzw. VNo. n und VNo. n+1. Es ergeben sich somit jeweils 10 Werte für die gemessenen aufgebrachten Massenträgheitsmomente.

6.3.6.3 Ergebnisse und Diskussion

Bild 6-12 zeigt die aus den Messungen errechneten aufgebrachten Massenträgheitsmomente im Vergleich zu den realen auf der Ordinate. Die Abszisse ist unterteilt in die fünf Prüf-Massenträgheitsmomente. Das kleinste und größte der fünf Prüf-Massenträgheitsmomente ist wie in Abschnitt 6.3.6.2 begründet jeweils zweifach aufgetragen.

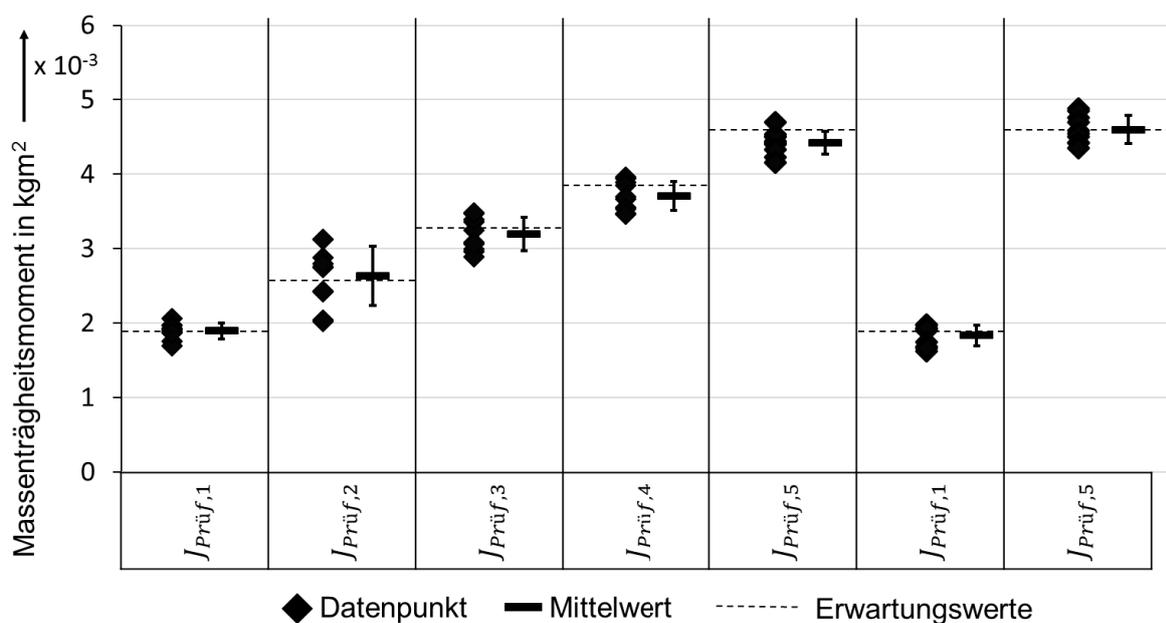


Bild 6-12: Aus den Messungen errechnete im Vergleich zu den fünf realen Prüf-Massenträgheitsmomenten

Die gemessenen Massenträgheitsmomente sind jeweils als rautenförmige Datenpunkte dargestellt. Der sich ergebende Mittelwert als Balkenmarkierung. Als Whisker sind hierbei die sich in der Messung ergebenden Standardabweichungen der Stichproben abgetragen. Die real aufgebrachten Prüf-Massenträgheitsmomente sind als durchgehende gestrichelte Linien im Diagramm dargestellt.

Die gemessenen Massenträgheitsmomente stimmen im Mittel alle innerhalb der Standardabweichung mit den aufgebrachten Prüf-Massenträgheitsmomenten überein. Im Mittel ist von einer aus dem Versuchsaufbau zu erwartenden Abweichung des gemessenen Wertes des Impedanzbetrages vom realen Impedanzbetrag von 6% bei einer Einzelmessung auszugehen. Bei jeweils 10 Messungen beträgt die Abweichung des Mittelwertes im Mittel 2,2%.

Die aus der Messung errechneten Phasenwinkel zwischen Kraft und Beschleunigung sind auf der Ordinate in Bild 6-13 dargestellt.

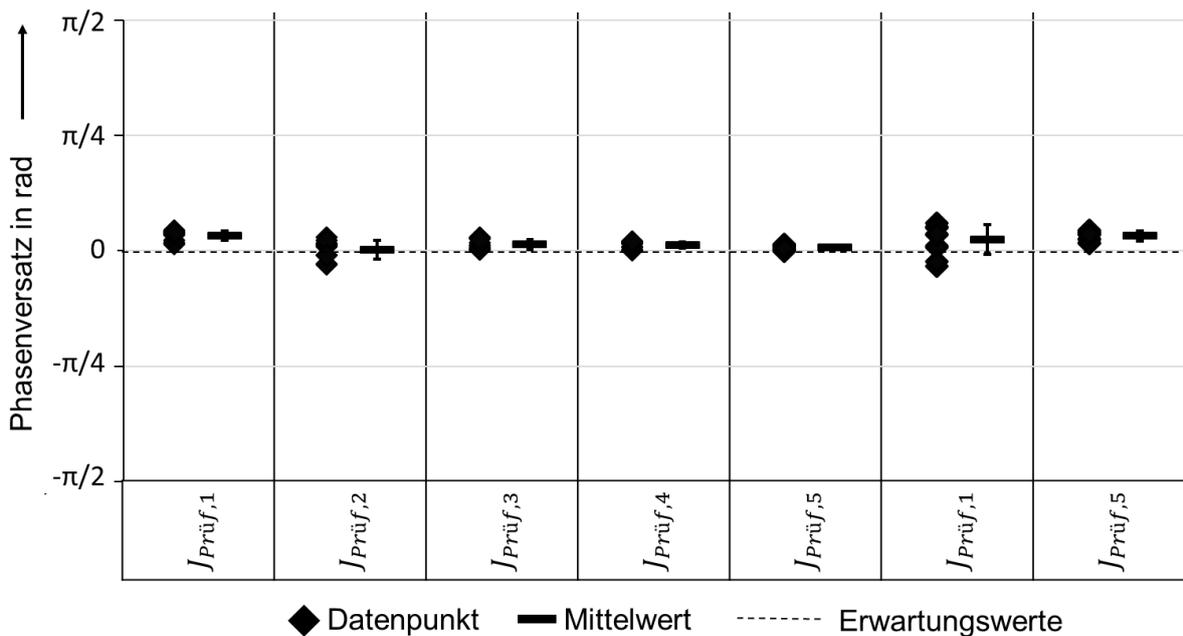


Bild 6-13: Aus den Messungen errechneter Phasenwinkel zwischen Kraft und Beschleunigung bei den fünf Prüf-Massenträgheitsmomenten

Der Erwartungswert bei einer real aufgebrachten Masse beträgt 0 rad, da bei einer starren Masse kein Versatz zwischen Kraft und Beschleunigung auftritt. Die 0 rad Linie ist als gestrichelte Linie hervorgehoben. Das Ergebnis stimmt mit dem erwarteten Ergebnis weitgehend überein. Die Abweichung zwischen erwarteter und gemessener Phase beträgt bei einer Einzelmessung im Mittel 0,068 rad ($3,9^\circ$). Bei jeweils 10 Messungen beträgt die Abweichung des Mittelwertes im Mittel 0,056 rad ($3,2^\circ$).

Die Ergebnisse der Versuchsvorgänge mit aufgebrauchten Prüf-Massenträgheitsmomenten $J_{Prüf,1}$ und $J_{Prüf,5}$ zeigen sich auch in ihrer Wiederholung mit zeitlichem Abstand innerhalb der Streuung unverändert. In Summe kann geschlossen werden, dass sich das Messsystem robust gegenüber Unsicherheiten bei der Anbringung von Massen und dem übrigen Messaufbau zeigt. Die in Abschnitt 6.3.5 getroffenen Annahmen und Vereinfachungen zur Bestimmung der passiven Anwendereigenschaften (Hand-Arm System Impedanz) sind zumindest für das Aufbringen einer realen Masse zulässig. Da zur vermuteten scheinbaren Masse des Hand-Arm Systems äquivalente Massen aufgebracht wurden, ist ebenfalls davon auszugehen, dass sich die Leerimpedanz des Griffes bei der Impedanzmessung am Anwender nicht verändert. Weiter treten bei diesen Massen keine Kraftbrücken im Griff auf, sodass sich das Messsystem zur Bestimmung der Anwenderimpedanz eignet. In der Verifizierung wurden die in MATLAB® erstellten Algorithmen zur Berechnung der Impedanz genutzt. Das Ergebnis verifiziert somit auch die Funktion dieser Algorithmen.

6.4 Zwischenfazit zur entwickelten Methode für die Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschraubegriff

Im Abschnitt 6.3 wurde eine Methode entwickelt, die dem Stand der Forschung erstmalig eine Untersuchungsmöglichkeit bereitstellt, die passiven Anwendereigenschaften direkt am Impulsschraubegriff zu erforschen. Ein Novum bildet darüber hinaus die Möglichkeit zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften in einer Drehbewegung. Bei der Entwicklung dieser Methode wurden bekannte Zusammenhänge zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften aus dem Stand der Forschung aufgegriffen und diese auf die spezifische Fragestellung der Messung von passiven Anwendereigenschaften direkt am Impulsschraubegriff hin weiterentwickelt. Hierdurch entsteht eine über den Stand der Forschung hinausgehende Methode, die auf die spezifischen Fragestellungen der Untersuchung von passiven Anwendereigenschaften in einer durch Drehung hervorgerufenen Bewegung (ISO 10068:2012-12 x_h -Richtung) angepasst ist. Diese eröffnet erstmals Untersuchungsmöglichkeiten zu den passiven Anwendereigenschaften bei zum Impulsschraubegriff vergleichbarer Außenkontur in zur realen Anwendung vergleichbaren Haltungen. Basis der entwickelten Methode bildet die detaillierte Beschreibung eines exemplarischen angepassten Impulsschraubers, welcher die Erfassung der Beschleunigung und der resultierenden Kraft zwischen Griff und Hand nahe des Handmittelpunktes bei einer alternierenden Drehbewegung mit 23 Hz ermöglicht.

Die erstellte Methode und deren zu Grunde liegenden Annahmen und Algorithmen konnten durch den Einsatz einer auf Basis der ISO 10068:2012-12 auf die vorliegende Problemstellung angepasste Verifizierungsmethode bezüglich ihrer grundlegenden Möglichkeit, Impedanzen in zum Hand-Arm System vergleichbarer Größenordnung zu erfassen, umfänglich verifiziert werden. Die hierbei genutzte weiterentwickelte Verifizierungsmethode unterscheidet sich vom Stand der Forschung insbesondere in der Möglichkeit, sie auf Drehbewegungen anwenden zu können und in der Verwendung von realen Massen, die der scheinbaren Masse des Hand-Arm Systems entsprechen.

Bezüglich der zweiten Unterfrage der zweiten Forschungsfrage lässt sich zusammenfassend zu Abschnitt 6.3 feststellen:

Forschungsfrage 2: Untersuchung der veränderlichen passiven Anwendereigenschaften am Griff eines Impulsschraubers

Welche Methode eignet sich zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschraubegriff und wie kann die Messung der Impedanz verifiziert werden?

Der in Abschnitt 5.6 entwickelte und in Abschnitt 6.3 weiterentwickelte Impulsschrauber-Messgriff eignet sich unter Zuhilfenahme der in Abschnitt 6.3 entwickelten Methoden für die Bestimmung einer scheinbaren Masse (und somit der zur realen Masse äquivalenten Impedanz auf dem Griff in Betrag und Phase), welche im Betrag dem Hand-Arm System ähnlich ist. Unter Anwendung der entwickelten Methoden zur Kontrolle der Probandenhaltung, der Greifkraft und der Andruckkraft aus Abschnitt 5.6.2 und Abschnitt 5.6.3 kann diese Methode zur Bestimmung der Anwenderimpedanz und somit zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschrauber genutzt werden.

6.5 Untersuchung der veränderlichen passiven Anwendereigenschaften am Griff bei der Nutzung eines Impulsschraubers (Methodenanwendungs- und -evaluierungsphase)

Mit Hilfe der entwickelten Methode aus Abschnitt 6.3 wird im Folgenden geklärt, ob sich die passiven Anwendereigenschaften bei gleicher Anregung durch die Armhaltung, Greifkraft, Andruckkraft und die anthropometrischen Charakteristiken und Konstitution - also die Variation des Anwenders – am Impulsschrauber verändern lassen¹⁸⁷. Die Einflussfaktoren werden unter Nutzung der in Abschnitt 5.6 entwickelten Methoden variiert. Der Einflussfaktor - die Heterogenität der anthropometrischen Charakteristiken bzw. die Konstitution - wird durch die Variation der Versuchsperson untersucht. Das Ziel der Versuche ist hierbei die Überprüfung der entwickelten Methode auf Ihre Anwendbarkeit. Zeitgleich fokussiert der Abschnitt erste Erkenntnisse, ob und in welcher Stärke die einzelnen Einflussfaktoren die passiven Anwendereigenschaften in Drehrichtung zur Unterarmachse verändern. Über den Stand der Forschung hinausgehend wird diese Untersuchung durch die entwickelte Methode erstmals an einer zu realen Gerätegriffen vergleichbaren Außenkontur in zur realen Anwendung vergleichbaren Haltungen in Drehrichtung zur Unterarmachse durchgeführt. Die passiven Anwendereigenschaften werden hierbei durch die Impedanz in Betrag und Phase quantifiziert. Ein weiterer Kern der Methodenanwendung bildet die erstmalige Erkenntnis darüber, ob die Veränderung der Impedanz des Anwenders mit einer Veränderung des Bewegungsverhaltens des Gerätes einhergeht. Das Bewegungsverhalten wird hierbei durch den Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} quantifiziert (vgl. Abschnitt 5.2).

6.5.1 Versuchsdesign

Als Versuchsdesign wird ein zweistufiger vollfaktorieller Versuchsplan der Parameter Person, Haltung, Andruck- und Greifkraft gewählt. In Abschnitt 5.7 konnte gezeigt werden, dass die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften einen Einfluss auf das grundlegende Bewegungsverhalten des Impulsschraubers hat. Außerdem konnte in Abschnitt 5.7 gezeigt werden, dass die Parameter nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können. Es konnten keine mathematisch beschreibbaren Abhängigkeiten der Parameter auf das Bewegungsverhalten

¹⁸⁷ Im vorherigen Kapitel wurde der Beweis erbracht, dass die Einflussfaktoren das Bewegungsverhalten des Impulsschraubers verändern. Der Nachweis, dass diese tatsächlich auch die passiven Anwendereigenschaften in der Drehrichtung zur Unterarmachse beeinflussen, steht jedoch noch aus.

abgeleitet werden. Somit können auch in den nachfolgenden Versuchen keine verkürzten Versuchspläne genutzt werden. Die untersuchten Faktorstufen entsprechen den Faktorstufen in Abschnitt 5.7 und sind in Tabelle 6-5 zusammengefasst. Im Fokus dieser Studie steht die Überprüfung der Anwendbarkeit der neu entwickelten Methode und exemplarische erste Erkenntnisse, ob die einzelnen Einflussfaktoren die passiven Anwendereigenschaften verändern. Der Fokus bei der Probandenauswahl liegt somit auf möglichst verschiedenen Körpergewichten bei vergleichbarer Körpergröße, um die Haltung nicht zu beeinflussen aber dennoch möglichst verschiedene anthropometrische Charakteristiken zu erhalten.

Tabelle 6-5: Übersicht über die durchgeführten Versuche zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschraubegriff

	Faktorstufen Ausprägung Stufe 1 (-)	Faktorstufen Ausprägung Stufe 2 (+)
Untersuchte Haltungen	Haltung 1 „Vor der Brust“ (vgl. Bild 5-20 links)	Haltung 2 „Über Kopf“ (vgl. Bild 5-20 rechts)
Untersuchte Probanden	Proband 1 (m) Körpergröße: 1,72 m Gewicht: 109 kg Alter: 30-35 Jahre	Proband 2 (m) Körpergröße: 1,73 m Gewicht: 69 kg Alter: 20-25 Jahre
Untersuchte Greifkräfte	20 N	95 N
Untersuchte Andruckkräfte	7 N	30 N
Minimale Einzelversuchszeit und Mittelungszeit für Schwingungswerte	10 s	

Die in Abschnitt 6.3.6.2 dargelegten Punkte bezüglich der Verkürzung des Anwendungsmodells, Akkuladung und Temperatur behalten auch in diesem Versuchsdesign ihre Gültigkeit. Um weitere unbekannt Einflüsse sicher ausschließen zu können, wird, wie in Abschnitt 6.3.6.2 erläutert, ein alternierender Versuchsplan genutzt. Um eine Langzeit-Drift auszuschließen und die Ergebnisse abzusichern,

werden zu Beginn und zur Mitte einer jeden Versuchsreihe Versuche mit den Prüf-Massenträgheitsmomenten $J_{Prüf,1}$ und $J_{Prüf,5}$ ausgeführt. Es ergibt sich das in Tabelle 6-6 dargestellte Versuchsvorgehen:

Tabelle 6-6: Schema der 11 Versuchswiederholungen zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften am Impulsschraubegriff

	1. Wiederholung	...	11
VNo. 0	Leerimpedanz	...	...
VNo. 1	$J_{Prüf,1}$	...	...
VNo. 2	$J_{Prüf,5}$	...	...
VNo. 3	Leerimpedanz	...	...
VNo. 4	Parametersatz 1 (Eine Kombination aus den in Tabelle 6-5 dargestellten Einflussfaktoren)	...	...
VNo. 5	Parametersatz 2	...	...
VNo. 6	Leerimpedanz	...	...
...
VNo. 16	Leerimpedanz	...	...
VNo. 17	$J_{Prüf,1}$	...	...
VNo. 18	$J_{Prüf,5}$	...	...
VNo. 19	Leerimpedanz	...	...
...
VNo. 29	Parametersatz 15	...	...
VNo. 30	Parametersatz 16	...	...
VNo. 31	Leerimpedanz	...	...

Für jeweils einen der 16 möglichen Versuchsparametersätze (Eine Haltung, eine Person, eine Andruck- und eine Greifkraft) werden 11 Versuchswiederholungen durchgeführt. Jeder Parametersatz grenzt im Versuchsablauf an eine Messung der Leerimpedanz. Die Bestimmung der gemessenen Impedanz erfolgt wie in Abschnitt 6.3.5 beschrieben, nach Gl. 6-20 mit $r_a = 93 \text{ mm}$ und $r_{Hand} = 83 \text{ mm}$ beziehungsweise im Falle der Prüfmassen $r_{Hand} = r_{Ersatz}$ nach Tabelle 6-3, in Betrag

und Phase. Es kommt der paarweise Vergleich von Messung VNo. n und Messung der Leerimpedanz VNo. n-1 beziehungsweise VNo. n und VNo. n+1 zum Einsatz.

Für jeden einzelnen Versuch wird hierbei folgendes Versuchsvorgehen festgelegt:

- 1) Rücksetzen der Kraft-Sensorelemente auf Piezo-Basis
- 2) Aufnahme des Impulsschraubers durch den Probanden und Einnahme der korrekten Haltung mit Hilfe von Markierungen auf dem Boden und Anweisungen des Versuchsleiters auf Basis des Kamerabildes
- 3) Aufbringen der Andruck- und Greifkraft durch den Probanden
- 4) Aktivieren des Impulsschraubers und Einpendeln der Andruck- und Greifkraft
- 5) Beginn der Messung
- 6) Ende der Messung nach 10s Messzeit

6.5.2 Ergebnisse und Diskussion

6.5.2.1 Absicherung des Versuchsergebnisses

Zur Absicherung des gesamten Versuchsergebnisses wird innerhalb der 11 Versuchswiederholungen jeweils zweimal ein Versuch mit den Prüf-Massenträgheitsmomenten $J_{Prüf,1}$ und $J_{Prüf,5}$ ausgeführt (vgl. Tabelle 6-6). Bild 6-14 zeigt die aus den Messungen errechneten Massenträgheitsmomente in Betrag und Phase im Vergleich zu den Erwartungswerten auf der Ordinate. Die Abszisse ist unterteilt in die zwei Prüf-Massenträgheitsmomente.

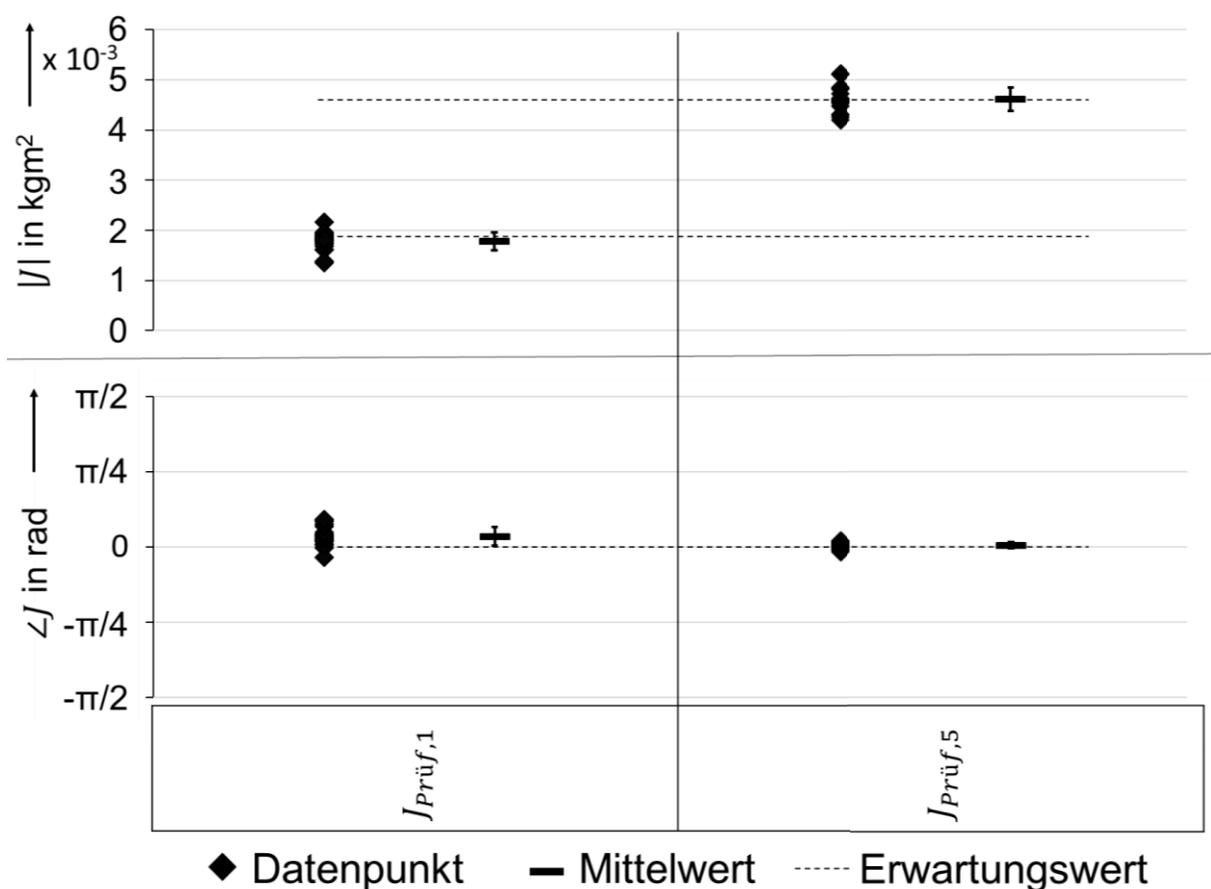


Bild 6-14: Aus den Messungen errechnete im Vergleich zu den beiden realen Prüf-Massenträgheitsmomenten in Betrag und Phase

Die gemessenen Massenträgheitsmomente sind jeweils in Betrag und Phase als rautenförmige Datenpunkte dargestellt. Der sich ergebende Mittelwert als Balkenmarkierung. Als Whisker sind hierbei die sich in der Messung ergebenden Standardabweichungen der Stichproben abgetragen. Als durchgehende gestrichelte Linien sind die aufgebrauchten Prüf-Massenträgheitsmomente im Diagramm dargestellt.

Der gemessene Betrag stimmt im Mittel innerhalb der Standardabweichung mit beiden Prüf-Massenträgheitsmomenten überein. Die Phase zeigt im Mittelwert nur geringe Abweichungen ($0,1 \text{ rad} = 5,7^\circ$) vom Erwartungswert (0 rad) für die kleinere der beiden Prüfmassen. Bei Einbezug der Standardabweichung beträgt die Abweichung nur $0,01 \text{ rad} = 0,6^\circ$. Das gleiche Ergebnis konnte bereits in Abschnitt 6.3.6.3 bei der Verifikation des Messsystems festgestellt werden. Beim aufgebrauchten größeren Prüf-Massenträgheitsmoment stimmt die Phase innerhalb der Standardabweichung mit dem Erwartungswert überein.

Da die Daten auch in zeitlicher Folge betrachtet keine Drift aufweisen, lässt sich somit feststellen, dass sich das Messsystem innerhalb der durchgeführten Messungen nicht

verändert hat. Sowohl Betrag als auch Phase zweier Prüf-Massenträgheitsmomente, die dem oberen und unteren Ende der bei der Messung zu erwartenden Impedanz des Hand-Arm Systems nach ISO 10068:2012-12 entsprechen (vgl. Abschnitt 6.3.6), können über die gesamte Messreihe hinweg unter den zu erwartenden, in Abschnitt 6.3.6 erläuterten, Abweichungen bestimmt werden.

6.5.2.2 Darstellung der Ergebnisse

Die gewählte Darstellungsform entspricht im Wesentlichen den Darstellungsformen der vorangegangenen Ergebnisse innerhalb dieser Arbeit. Die gemessenen Impedanzen sind jeweils als rautenförmige Datenpunkte dargestellt. Der sich ergebende Mittelwert als Balkenmarkierung. Gleiches gilt für die Phase der Impedanz. Als Whisker sind hierbei die sich in der Messung ergebenden Standardabweichungen der Stichproben aufgetragen. Im Text wird die Differenz der Mittelwerte als ΔMW angegeben. Die Differenz zwischen den Standardabweichungen der Stichproben, also der Betrag zwischen oberem und unterem aufgetragenen Whisker zweier benachbarter Versuchsreihen, wird als ΔSD bezeichnet. Wenn $\Delta SD: \leq 0$ ist, so überlappen sich die beiden Standardabweichungen der Stichproben. Im Kontext dieser Arbeit wird in diesem Fall nur von Tendenzen gesprochen.

Die obere und untere Abweichungsgrenze sowie der Durchschnitt der nach ISO 10068:2012-12 angegebenen Impedanz-Verläufe in Betrag und Phase sind jeweils als durchgehende gestrichelte Linien im Diagramm dargestellt. Zusätzlich zur gemessenen Impedanz ist auch die Auswirkung der untersuchten Versuchsparameter auf den Effektivwert der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFW} des Impulsschraubers dargestellt. Die grundlegende Darstellungsform der Daten entspricht der der Impedanz. Da jedoch die absolute Auswertung des a_{HFW} -Wertes, wie bereits in Abschnitt 5.7.2 festgestellt, nicht zielführend ist, muss auch hier eine relative Auswertung erfolgen. Hierfür wird das folgende Vorgehen zur Auswertung gewählt.

Wie in Tabelle 6-6 ersichtlich, grenzt jede Messung für einen untersuchten Parametersatz an eine Messung, in welcher die Leerimpedanz des Griffes erfasst wird. Der Beschleunigungseffektivwert, welcher sich bei dieser Leerimpedanz-Messung einstellt, ist der Beschleunigungseffektivwert des Gerätes ohne den Einfluss eines Anwenders. Dieser Beschleunigungseffektivwert bildet für jede einzelne der direkt vorhergehenden oder folgenden Messungen mit einem untersuchten Parametersatz den Bezugswert. Der sich einstellende Beschleunigungseffektivwert wird jeweils in Relation zu diesem Wert in Prozent angegeben. Das Vorgehen ist in Bild 6-15 qualitativ dargestellt.

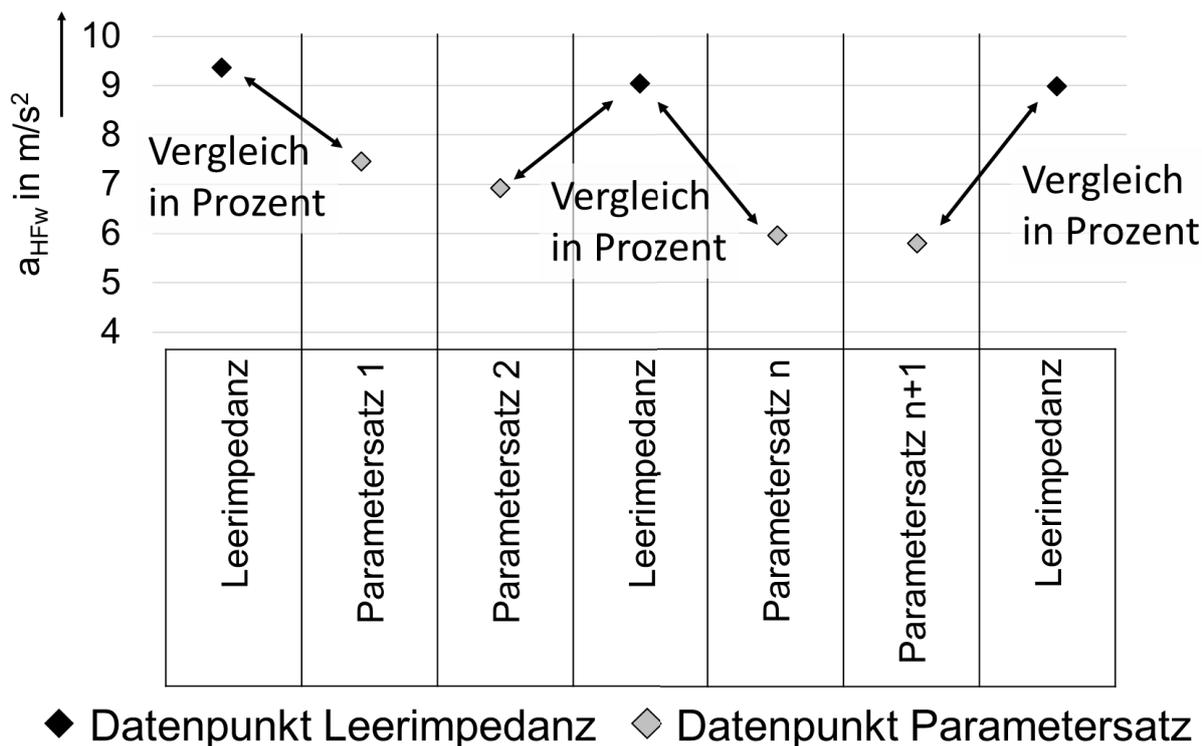


Bild 6-15: Vorgehen zur Bestimmung des Effektivwerts der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} in Prozent

Ein Wert von 100% bedeutet somit einen unveränderten Beschleunigungseffektivwert zwischen einem Versuch mit Anwender in einem untersuchten Parametersatz und einer Messung ohne Anwender. Ein Wert größer 100% steht für eine Erhöhung und ein Wert kleiner 100% für eine Verringerung des Beschleunigungseffektivwertes.

Die folgenden Auswertungen basieren auf einer gemeinsamen Datenbasis und sind zur vergleichenden Bewertung der einzelnen Parameter jeweils in einer abgeänderten Reihenfolge der Versuchsreihen dargestellt. Die jeweils in einer Diagrammsection dargestellten Daten (vgl. Bild 6-16 senkrechte Linie) basieren auf zwei Versuchsreihen, die sich nur durch einen Versuchsparameter unterscheiden.

6.5.2.3 Einfluss der Haltung auf die passiven Anwendereigenschaften bei der Nutzung eines Impulsschraubers

Bild 6-16 zeigt die gemessenen Impedanzen des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase unter den Effektivwerten der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz (ca. 23 Hz) in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Impulsschraubers beim Übergang der Probanden aus Haltung 1 in Haltung 2.

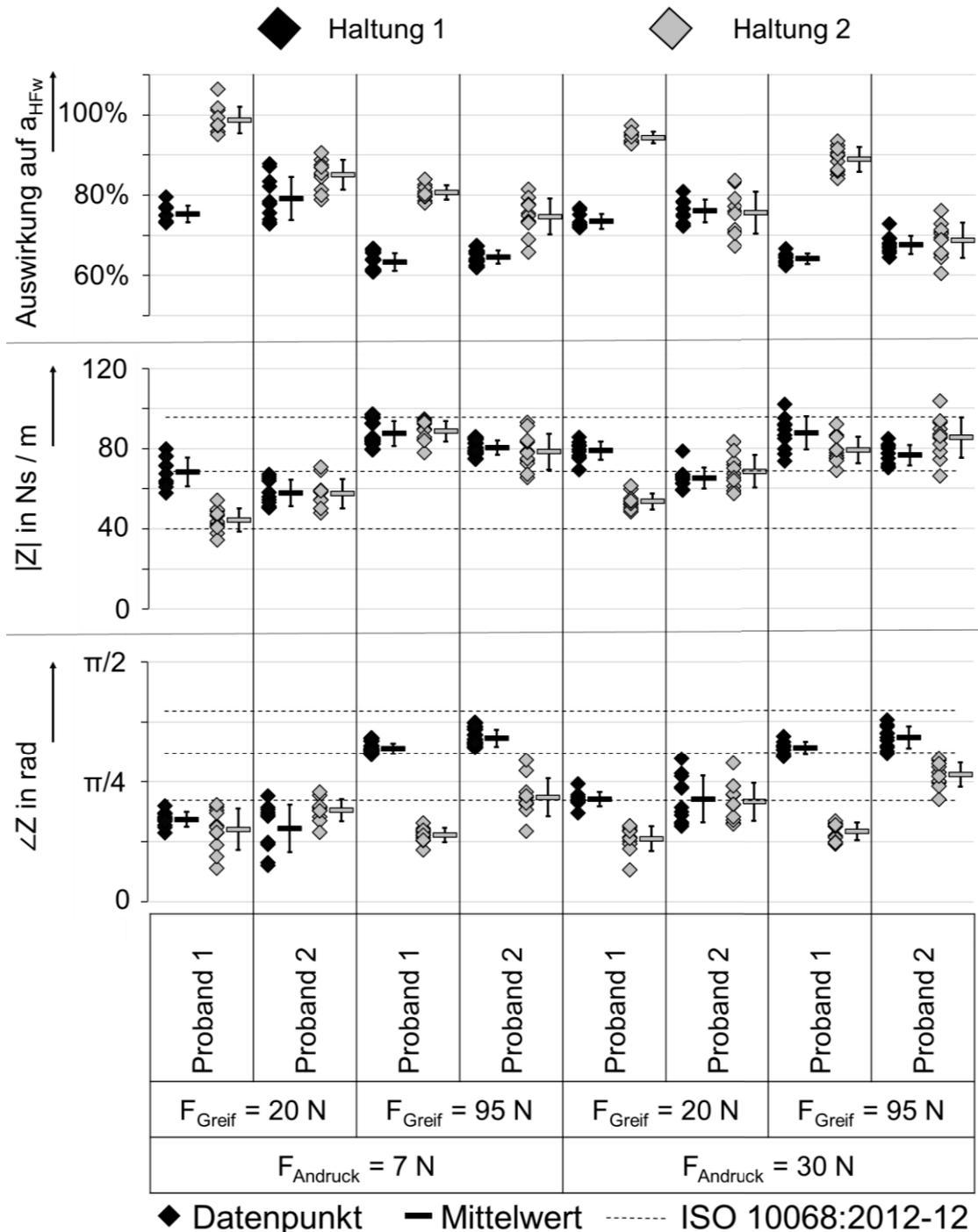


Bild 6-16: a_{HFw} -Wert des Impulsschraubers und Impedanz des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase bei Variation der Haltung

Bei Proband 1 kann bei geringer Greifkraft eine Absenkung des Betrages der Impedanz beobachtet werden (bis zu ΔMW : 24,0 Ns/m bei ΔSD : 11,1 Ns/m). Ebenfalls tritt eine geringe Absenkung der Phase der Impedanz auf. Bei hoher Greifkraft tritt diese Absenkung im Betrag nicht auf. Hier kann jedoch eine sehr deutliche Reduzierung der Phase der Impedanz beobachtet werden (maximal ΔMW : 0,56 rad bei ΔSD : 0,48 rad). Bei allen untersuchten Parametervariationen steigt der a_{HFw} -Wert

beim Übergang von Haltung 1 zu Haltung 2 bei Proband 1 dabei deutlich an (bis zu ΔMW : 24,8% bei ΔSD : 20,4%).

Bei Proband 2 ist nur im Falle hoher Greifkraft und niedriger Andruckkraft eine Erhöhung des a_{HFw} -Wertes beim Übergang von Haltung 1 zu Haltung 2 beobachtbar. Wie auch bei Proband 1 ist in diesem Falle eine Reduzierung der Phase der Impedanz bei gleichbleibendem Betrag beobachtbar.

Über beide Probanden hinweg ist beobachtbar, dass bei hoher Greifkraft die Phase der Impedanz sinkt, jedoch nicht der Betrag. Es lässt sich weiter feststellen, dass eine Veränderung des a_{HFw} -Wertes mit einer Veränderung der Phase oder des Betrages der Impedanz einhergeht. Weiter ist ersichtlich (vgl. beispielsweise Greifkraft hoch, Andruckkraft niedrig, Haltung 1), dass auch über den Probandenwechsel hinweg ein ähnlicher Betrag und eine ähnliche Phase der Impedanz mit einem ähnlichen a_{HFw} -Wert einhergehen. Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.7 zeigt hierbei bei Proband 1 gleiche Ergebnisse in der a_{HFw} -Wertänderung. Bei Proband 2 hat die Haltungsänderung weniger Effekt auf den a_{HFw} -Wert als bei den in Abschnitt 5.7 untersuchten Probanden.

Es kann geschlossen werden, dass die Haltung die Impedanz des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase stark verändern kann. Die Änderung ist hierbei abhängig von den drei übrigen untersuchten Parametern.

Für alle untersuchten Fälle (auch 6.5.2.4 - 6.5.2.6) kann festgestellt werden, dass sich der Betrag der Impedanz innerhalb der angegebenen Grenzen in ISO 10068:2012-12 verändert. Die gemessene Phase der Impedanz weicht von den angegebenen Abweichungsgrenzen der ISO 10068:2012-12, insbesondere in Haltung 2 (also eine von der Referenzhaltung der ISO 10068:2012-12 stark abweichende Haltung), nach unten ab.

6.5.2.4 Einfluss der Andruckkraft auf die passiven Anwendereigenschaften bei der Nutzung eines Impulsschraubers

Die gemessenen Impedanzen des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase und die Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Impulsschraubers bei der Andruckkraftänderung von 7 N auf 30 N sind in Bild 6-17 dargestellt.

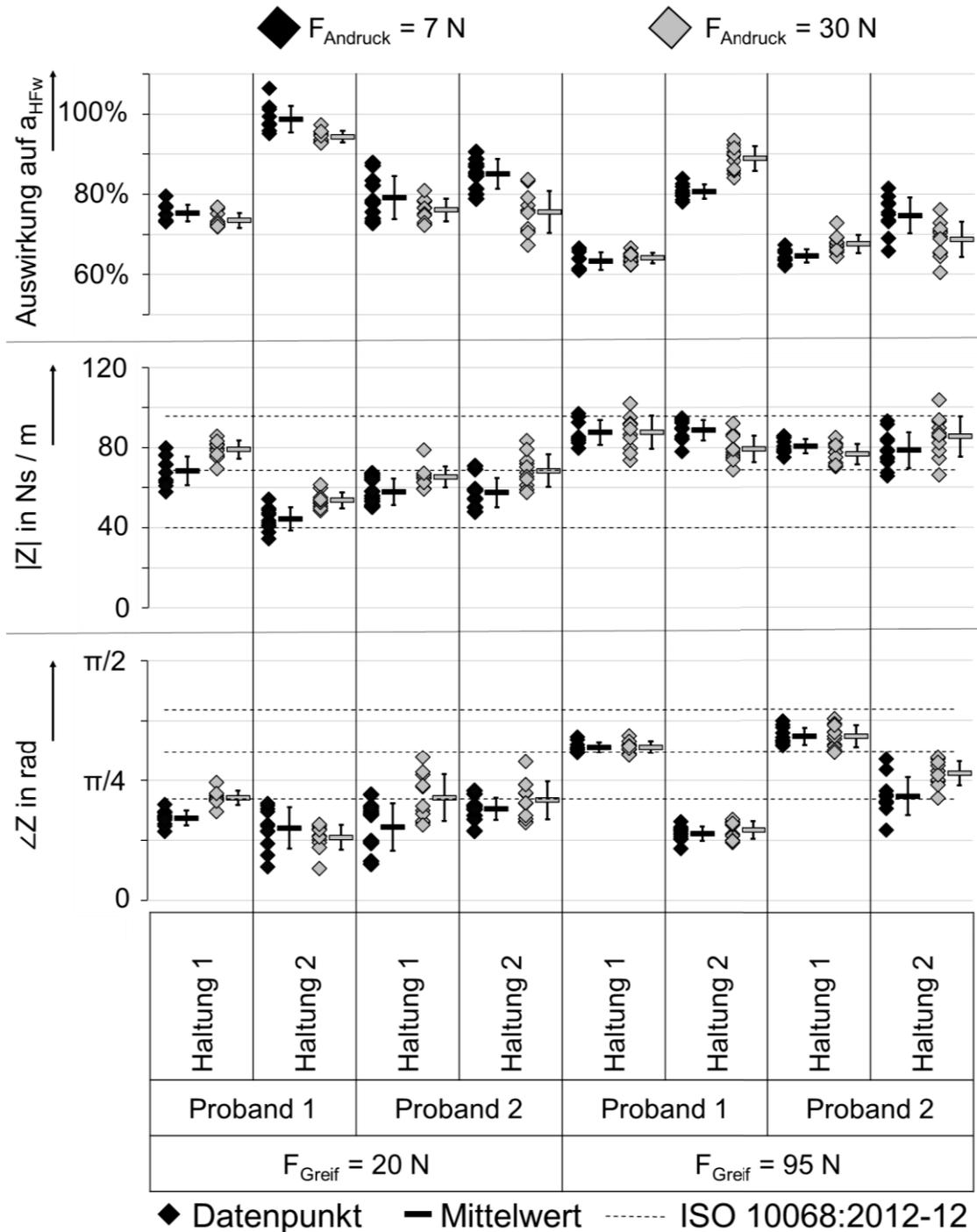


Bild 6-17: a_{HFw} -Wert des Impulsschraubers und Impedanz des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase bei Variation der Andruckkraft

Der Betrag und die Phase der Impedanz des Hand-Arm Systems werden bei den untersuchten Parametern durch die Andruckkraft bei beiden Probanden kaum verändert ($\Delta SD: \leq 0$). Der a_{HFw} -Wert zeigt sich ebenfalls nicht sensitiv gegenüber der Andruckkraftänderung ($\Delta SD: \leq 0$). Tendenziell geht eine schwache Zunahme des Betrages der Impedanz mit einer schwachen Abnahme des a_{HFw} -Wertes einher.

Es kann geschlossen werden, dass die untersuchten Andruckkräfte nur sehr geringen Einfluss auf Betrag und Phase der Impedanz des Hand-Arm Systems bei 23 Hz haben. Es lässt sich zudem feststellen, dass auch die Vibration des Impulsschraubers, welche durch den a_{HFw} -Wert quantifiziert wird, nur gering beeinflusst wird. Ein quantitativer Vergleich mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.7 ist nicht zielführend, da die Auswirkungen der untersuchten Andruckkräfte zu gering sind. Qualitativ lässt sich jedoch auch hier feststellen, dass die Andruckkraft nur geringen Einfluss auf den a_{HFw} -Wert hat.

6.5.2.5 Einfluss der Greifkraft auf die passiven Anwendereigenschaften bei der Nutzung eines Impulsschraubers

Bild 6-18 zeigt die gemessenen Impedanzen des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase unter den Effektivwerten der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Impulsschraubers beim Übergang der Greifkraft von 20 N auf 95 N.

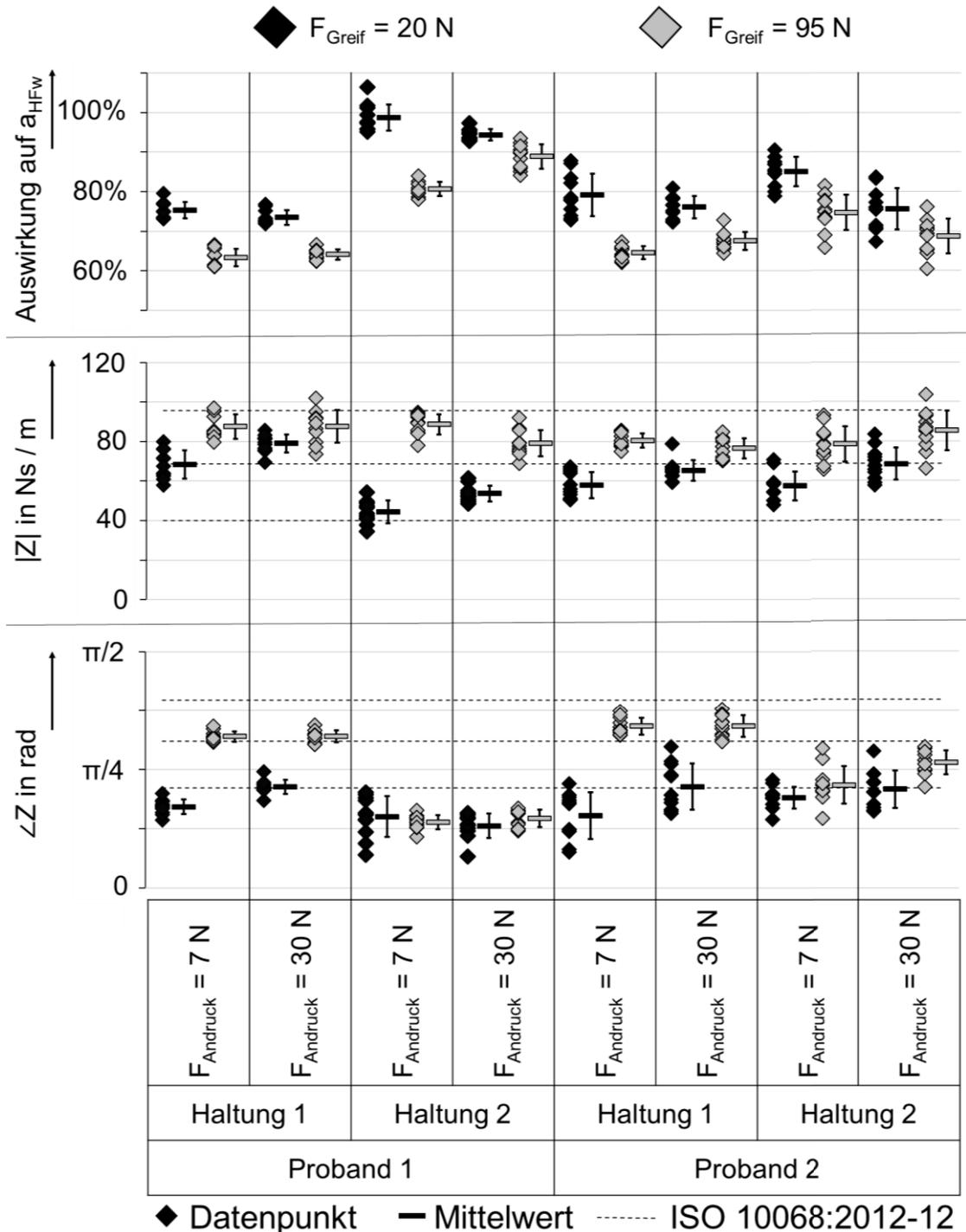


Bild 6-18: a_{HFw} -Wert des Impulsschraubers und Impedanz des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase bei Variation der Greifkraft

In allen untersuchten Parameterkombinationen beeinflusst die Greifkraft den Betrag der Impedanz des Hand-Arm Systems in zunehmender Richtung. Insbesondere in der Haltung 2, welche von der in ISO 10068:2012-12 beschriebenen Haltung stark abweicht, hat die Greifkraft eine starke Auswirkung auf den Betrag der Impedanz (bis zu ΔMW : 44,3 Ns/m bei ΔSD : 33,5 Ns/m bei Proband 1). Die Phase wird hierbei in allen untersuchten Parameterkombinationen in Haltung 1 in erhöhender Richtung stark beeinflusst (maximal ΔMW : 0,46 rad bei ΔSD : 0,38 rad). In Haltung 2 ist hingegen kein Effekt der Greifkraft auf die Phase der Impedanz beobachtbar. Bei allen untersuchten Parametervariationen sinkt der a_{HFw} -Wert beim Übergang von schwacher zur starker Greifkraft deutlich ab (bis zu ΔMW : 18,0% bei ΔSD : 12,9%).

Über alle Versuche hinweg ist beobachtbar, dass eine Veränderung des a_{HFw} -Wertes mit einer Veränderung der Phase oder des Betrages der Impedanz einhergeht. Hierbei kann festgestellt werden, dass eine Erhöhung des Betrages der Impedanz mit einer Reduzierung des a_{HFw} -Wertes einhergeht. Hervorzuheben ist zudem, dass bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Phase die Reduzierung des a_{HFw} -Wertes tendenziell stärker ausfällt. Vergleichend mit Abschnitt 5.7 zeigt sich ebenfalls eine sehr hohe Abhängigkeit des a_{HFw} -Wertes von der Greifkraft. Anzumerken ist eine gegensätzliche Wirkung auf den a_{HFw} -Wert bei der Greifkraftänderung. Eine Erklärung hierfür bietet das veränderte Modell der Anwendung innerhalb beider Versuche. Während in Abschnitt 5.7 eine Orbitalbewegung des Beschleunigungssensors am Griff möglich war¹⁸⁸ und sich eine Drehpunktüberlagerung zwischen Schraube und Handgelenk einstellen konnte, so ist innerhalb der Versuche in diesem Abschnitt nur eine kreisförmige Bewegung des Beschleunigungssensors möglich. Die Versuche in den beiden Abschnitten sind somit hinsichtlich der Auswirkungsrichtung nicht direkt miteinander vergleichbar, jedoch in sich konsistent.

Es kann geschlossen werden, dass die Greifkraft die Impedanz des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase stark verändern kann. Ob eine Änderung in der Phase der Impedanz auftritt, ist hierbei abhängig von den drei übrigen untersuchten Parametern.

¹⁸⁸ Die Schnittstelle zwischen Schrauber und Schraube kann nicht als komplett winkelstarr angenommen werden.

6.5.2.6 Einfluss des Probanden auf die passiven Anwendereigenschaften bei der Nutzung eines Impulsschraubers

Die gemessenen Impedanzen des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase und die Effektivwerte der Beschleunigung bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFw} des Impulsschraubers beim Probandenwechsel sind in Bild 6-19 dargestellt.

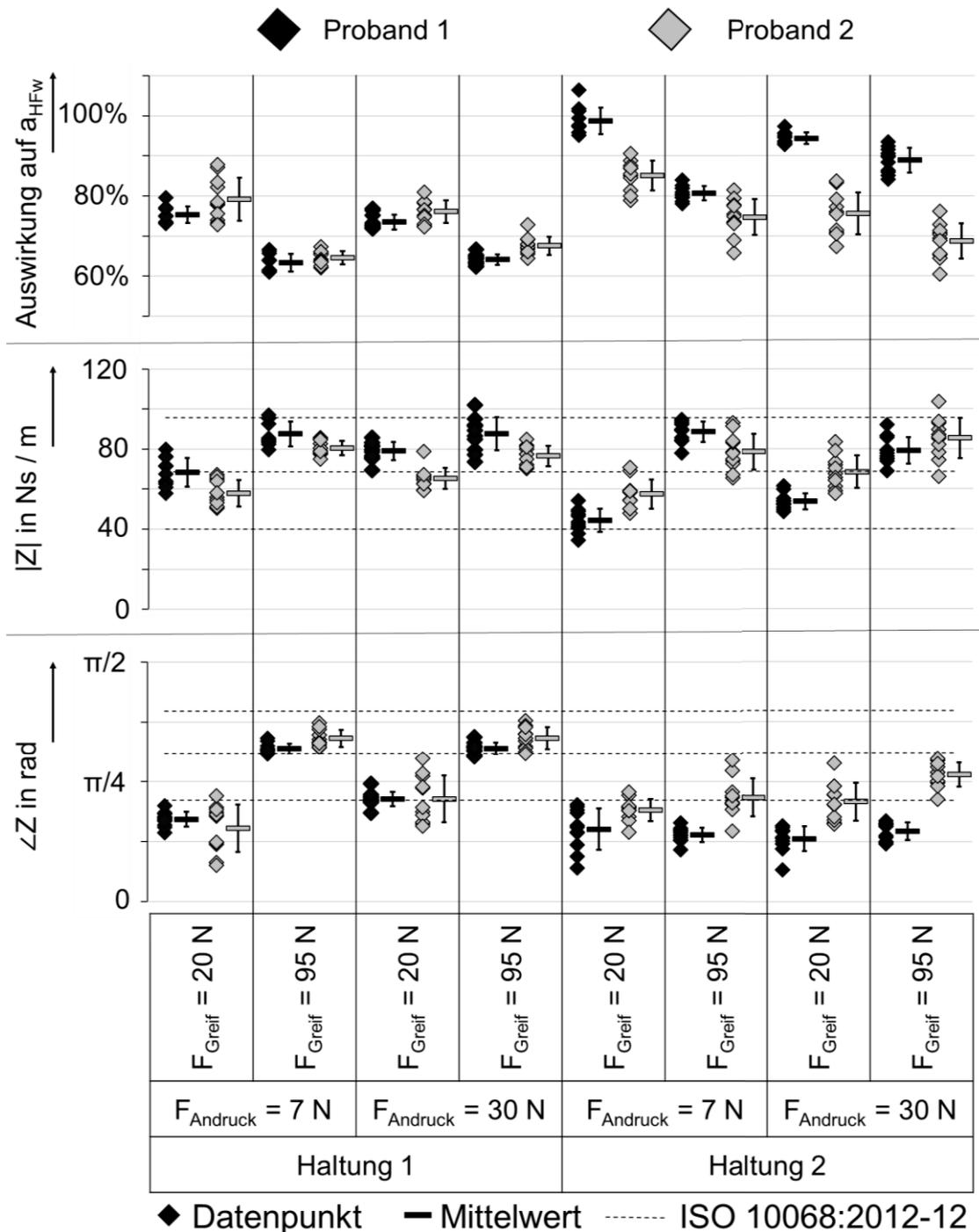


Bild 6-19: a_{HFw} -Wert des Impulsschraubers und Impedanz des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase bei Variation des Probanden

Die Wechsel des Probanden von Proband 1 (schwerer, älter) zu Proband 2 (leichter, jünger) haben einen heterogenen Einfluss auf den gemessenen Betrag der Impedanz. Während im Falle Haltung 1 der Betrag der Impedanz durch den Probandenwechsel für alle Fälle sinkt (bis zu ΔMW : 13 Ns/m bei ΔSD : 3,9 Ns/m), steigt der Betrag für niedrige Greifkräfte in Haltung 2 (bis zu ΔMW : 14,8 Ns/m bei ΔSD : 2,7 Ns/m). Für hohe Greifkräfte ist keine Veränderung des Betrages beim Probandenwechsel in Haltung 2 beobachtbar. Die Phase der Impedanz verändert sich in Haltung 1 nicht messbar. In Haltung 2 wird diese in positiver Richtung beeinflusst. Der Einfluss maximiert sich hierbei mit der Zunahme der Ankopplungskräfte (maximal ΔMW : 0,37 rad bei ΔSD : 0,23 rad). Während in Haltung 1 der a_{HFw} -Wert beim Übergang von Proband 1 auf Proband 2 nur schwach beeinflusst wird, nimmt er in Haltung 2 stark ab (bis zu ΔMW : 20% bei ΔSD : 12,7%).

In Summe ist beobachtbar, dass die durch den Probanden hervorgerufene Veränderung der Impedanz in Betrag und Phase in Haltung 2 mit Veränderungen des a_{HFw} -Wertes einhergehen. Sowohl bei niedriger als auch bei hoher Andruckkraft verändert sich der Betrag der Phase nur wenig (tendenziell aber gegenläufig). Die Phase hingegen verändert sich in beiden Versuchseinstellungen durch den Probandenwechsel in ähnlicher Größenordnung in positiver Richtung. Bei beiden Versuchskonfigurationen ändert sich der a_{HFw} -Wert in negativer Richtung. Eine positive Änderung in der Phase der Impedanz geht somit mit einer Reduktion des a_{HFw} -Wertes einher. Im Vergleich zu Abschnitt 5.7 lässt sich die große Einflussnahme des Probanden auf den a_{HFw} -Wert bestätigen.

Es kann geschlossen werden, dass der Proband sowohl die Phase als auch die Impedanz des Hand-Arm Systems in Haltung 2 stark beeinflussen kann. Unter der Annahme, dass sich durch den Probanden bei gleicher Greifkraft, Andruckkraft und Haltung nur die anthropometrischen Charakteristiken bzw. die Konstitution des Anwenders ändern, lässt sich die Aussage auf den Einfluss der anthropometrischen Charakteristiken bzw. der Konstitution übertragen.

6.6 Fazit zur Untersuchung der veränderlichen passiven Anwendereigenschaften bei der Nutzung eines Impulsschraubers

Die in Abschnitt 6.3 entwickelte Methode wurde innerhalb des Abschnitts 6.5 genutzt, um im Stand der Forschung erstmalig die Impedanz des Hand-Arm Systems exemplarisch in Betrag und Phase bei der Nutzung eines Impulsschraubers bei der Hauptfrequenz des Power-Tools zu bestimmen. Der Fokus der Versuche lag hierbei auf der Überprüfung der entwickelten Methode auf Ihre Anwendbarkeit. Zeitgleich konnten in diesem Abschnitt über den Stand der Forschung hinausgehende

Aufschlüsse darüber erlangt werden, dass sich die passiven Anwendereigenschaften bei gleicher Anregung durch die Armhaltung, Greifkraft, Andruckkraft und die anthropometrischen Charakteristiken und Konstitution - also die Variation des Anwenders - am Impulsschrauber verändern lassen.

In Kapitel 5 konnte gezeigt werden, dass Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. die Konstitution des Anwenders einen Einfluss auf das grundlegende Bewegungsverhalten in manuellen Tests des untersuchten Impulsschraubers haben. Erweiternd konnte innerhalb dieses Kapitels 6 nun exemplarisch quantitativ aufgezeigt werden, dass Haltung, Greifkraft und Proband sowohl den Betrag als auch die Phase der Impedanz des Hand-Arm Systems bei der Nutzung eines Impulsschraubers verändern können. Die Faktoren sind dabei nicht unabhängig voneinander, sondern beeinflussen sich gegenseitig. Die Andruckkraft hat auf Betrag und Phase der Impedanz in dem untersuchten Kräftebereich nur wenig Einfluss. Der Betrag der Impedanz veränderte sich in den durchgeführten Versuchen innerhalb der angegebenen Grenzen in ISO 10068:2012-12. Es konnte gezeigt werden, dass die gemessene Phase der Impedanz von den angegebenen Grenzen der aktuellen Normung in ISO 10068:2012-12 insbesondere in Haltung 2 (also eine von der Referenzhaltung der ISO 10068:2012-12 stark abweichende Haltung) nach unten stark abweicht.

Durch die neu entwickelte Methode ist es erstmalig möglich, innerhalb der Versuche eine Abnahme der Vibrationsstärke bei der Power-Tool-Hauptfrequenz in Hauptanregungsrichtung a_{HFW} mit einer Zunahme des Betrags der Impedanz des Hand-Arm Systems oder einer Zunahme der Phase der Impedanz zu verknüpfen. Nehmen sowohl Betrag als auch Phase zu, so wird dies von einem starken Abfall der Vibrationsstärke begleitet. Dieses Verhalten wird durch folgende theoretische Überlegungen gestützt:

Die Impedanz entspricht bei einer spezifischen Frequenz nach Gl. 2-2 einer im Phasenwinkel um $+\pi/2$ rad versetzten, proportionalen scheinbaren Masse. Diese scheinbare Masse kann in einen Betrag und eine Phase aufgespalten werden. Der Betrag entspricht dabei gedanklich einer realen Masse, die auf dem Griff aufgebracht ist. Die Phase gibt an, in welcher Phasenlage diese Masse zum Griff schwingt. Bei einer Impedanz-Phasenlage von $+\pi/2$ rad kann somit von einer vollständig eingekoppelten Masse ausgegangen werden, während bei einer Impedanz-Phasenlage von 0 rad die Masse um $\pi/2$ rad versetzt zum Griff schwingt. Die Masse tilgt hierdurch die Vibration.

Die Phasenlage der Impedanz weicht, wie bereits festgestellt, von den normativ angegebenen Grenzen der ISO 10068:2012-12 bei nach oben ausgestrecktem Arm ab. Da die Veränderung der Phase mit einer Veränderung des grundlegenden

Bewegungsverhaltens des Power-Tools einhergeht, kann festgestellt werden, dass sich auch das grundlegende Bewegungsverhalten stärker beeinflussen lässt als durch die Variation der Impedanzen in ISO 10068:2012-12 zu erwarten ist. Unter Einbezug der beiden Grundannahmen in Abschnitt 5.1 lässt sich feststellen, dass für eine realitätsnahe Abbildung des Anwendereinflusses auf einen Impulsschrauber (bei von der ISO 10068:2012-12 abweichenden Armhaltung) grundlegende Untersuchungen zur Änderung der Impedanz bei Haltungsänderungen notwendig sind.

Zusammenfassend für Kapitel 6 lässt sich die zweite Forschungsfrage aus Abschnitt 4.2 somit für den Impulsschrauber wie folgt beantworten:

Forschungsfrage 2: Untersuchung der veränderlichen passiven Anwendereigenschaften am Griff eines Impulsschraubers

In welcher Weise werden die passiven Anwendereigenschaften durch die Veränderung der Greif- und Andruckkraft, der Haltung und der anthropometrischen Charakteristiken bzw. der Konstitution des Anwenders bei der Benutzung eines Impulsschraubers beeinflusst?

Die am Griff eines Impulsschraubers untersuchten passiven Anwendereigenschaften, die sich durch die Impedanz in Betrag und Phase quantifizieren lassen, werden durch die Veränderung der Greifkraft, der Haltung und der anthropometrischen Charakteristiken bzw. der Konstitution des Anwenders bei der Benutzung eines Impulsschraubers beeinflusst. Die Andruckkraft spielt hierbei eine untergeordnete Rolle. Die Änderung der Haltung führt zu einer Änderung der Impedanz, die über die Streubreite des aktuellen Normenstands hinausgeht. Eine Veränderung in Betrag und Phase der Impedanz geht mit einer Veränderung des grundlegenden Bewegungsverhaltens des Impulsschraubers einher.

Abschließend wird das in diesem Kapitel erlangte Wissen über die Einflussstärken der untersuchten Parameter auf die Impedanz des Hand-Arm Systems bei der Nutzung eines Impulsschraubers in Form eines qualitativen Überblicks in Tabelle 6-7 zusammengefasst. Die Einflussstärke der einzelnen Parameter wird hierbei durch folgende qualitative Kategorien und deren Zwischenstufen beschrieben: (++) starker gesicherter Einfluss, (+) schwacher, aber gesicherter Einfluss und (0) kein bzw. kein feststellbarer Einfluss.

Tabelle 6-7: Qualitativer Überblick über die Einflussstärken der untersuchten Parameter auf die Impedanz des Hand-Arm Systems bei der Nutzung eines Impulsschraubers

	Einflussstärke auf Betrag	Einflussstärke auf Phase
Haltung	+ / ++	++
Andruckkraft	0	0
Greifkraft	++	++
anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution	+ / ++	+ / ++

7 Modellierung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften

In Kapitel 5 konnte gezeigt werden, dass die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften einen Einfluss auf das grundlegende Bewegungsverhalten eines untersuchten Impulsschraubers im manuellen Test hat und somit gemäß den Grundannahmen aus Abschnitt 5.1 auch die Beanspruchung des Power-Tools beeinflussen kann. Weiter konnte in Kapitel 6 dieser Arbeit festgestellt werden, dass die passiven Anwendereigenschaften, die sich durch die Impedanz in Betrag und Phase quantifizieren lassen, durch die Veränderung der Greifkraft, der Haltung und der anthropometrischen Charakteristiken bzw. der Konstitution des Anwenders bei der Benutzung eines Impulsschraubers beeinflusst werden. Die Abbildung der passiven Anwendereigenschaften und deren Heterogenität zur entwicklungsbegleitenden Validierung ist somit notwendig, falls zur realen Anwendung vergleichbare und veränderliche, aber dennoch reproduzierbare Beanspruchungen in Prüfstandversuchen erzielt werden sollen. Kernelemente solcher Prüfstände sind physische Modelle, welche die variierende Impedanz in Betrag und Phase reproduzierbar abbilden können. Diese Entwicklungsprüfstände sind ein Schlüsselfaktor in der Entwicklung, um den frühen Erkenntnisgewinn zu ermöglichen und späte teure Iterationen zu vermeiden (vgl. Abschnitt 1.1). Innerhalb dieses Kapitels 7 steht deshalb die Forschungsfrage im Vordergrund, ob sich die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in einem, zur Unterarm-Achse rotatorisch wirkenden, physischen Hand-Arm Modell für einen Impulsschrauber abbilden lässt.

7.1 Theoretische Vorbetrachtung (Analysephase)

Aus dem Stand der Forschung ist bekannt, dass die passiven Anwendereigenschaften durch Mehrmassen-Schwinger modelliert werden können (vgl. Abschnitt 2.3.6.2). Diese Systeme müssen dynamisch gleichwertig zu den passiven Anwendereigenschaften (der mechanischen Übertragungsfunktion, der Impedanz) des Anwenders wirken¹⁸⁹. Je mehr Massen-, Feder- und Dämpferelemente in solchen Modellen seriell oder auch parallel modelliert sind – also mit steigender Anzahl an Freiheitsgraden - desto genauer können sie die real gemessenen Impedanzen im Allgemeinen vorhersagen. Die einzelnen Massen werden mit steigender Anzahl der Freiheitsgrade der Modelle im Betrag allerdings immer kleiner. Eine Überführung in

¹⁸⁹ vgl. Marcotte et al. 2010

physische Modelle fällt somit immer schwerer, da Federn, Dämpfer und Lagerungen nicht masselos sein können. Modelle mit kleinerer Anzahl an Freiheitsgraden können die Impedanzen zwar nicht in einem großen Frequenzbereich vorhersagen, jedoch ist die Modellgüte für die Validierung von Geräten mit Anregungsfrequenzen unter 100 Hz ausreichend¹⁹⁰. Der Stand der Forschung legt hier den Einsatz einfacher Hand-Arm Modelle mit zwei oder vier Freiheitsgraden nahe¹⁹¹. Um die physische Abbildung der passiven Anwendereigenschaften für periodisch anregende Power-Tools in einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung zu ermöglichen, muss somit ein Ansatz für ein Hand-Arm Modell gefunden werden, der mit möglichst geringer Anzahl von Freiheitsgraden einhergeht. Diese Art von Modellen kann jedoch nur für einen spezifischen Frequenzbereich gültig sein¹⁹². Es lässt sich somit feststellen, dass potentiell prüfstandtaugliche Modelle justierbare Parameter benötigen, um in größeren Frequenzbereichen gültig sein zu können.

Innerhalb dieser ersten theoretischen Vorbetrachtung wird erstmals im Stand der Forschung geprüft, ob ein Modell mit wenig Freiheitsgraden durch justierbare Parameter in der Lage ist, die gemessenen auftretenden heterogenen passiven Anwendereigenschaften abzubilden.

7.1.1 Modellansatz am Impulsschraubergriff

Der weitaus größte Teil der periodisch in einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung anregenden Power-Tools ist mit einem sogenannten Pistolengriff ausgestattet. Wie bereits in Abschnitt 6.1.2 am Impulsschrauber gezeigt werden konnte, entspricht hierbei eine Drehbewegung, für die hier relevanten kleinen Winkelbewegungen, im Wesentlichen einer translatorischen Bewegung in x_h -Richtung der Hand im griffest orientierten Koordinatensystem (vgl. Bild 7-1).

¹⁹⁰ vgl. Dong et al. 2008

¹⁹¹ vgl. Dong et al. 2008

¹⁹² vgl. Rakheja et al. 1993

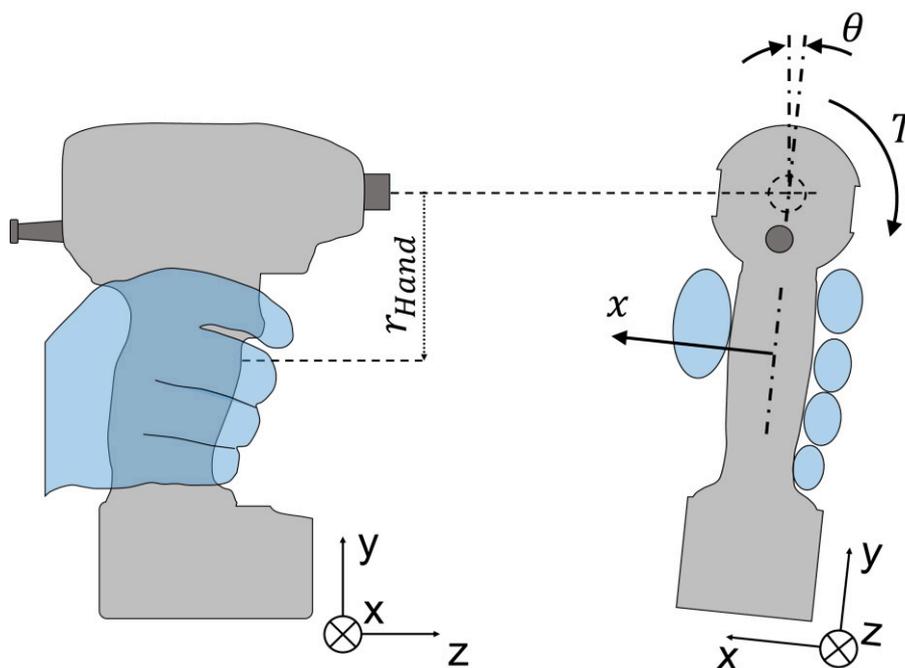


Bild 7-1: Translatorische Bewegung der Hand aufgrund einer drehenden Bewegung des Pistolengriffes

Da hierbei die x-Richtung in der Orientierung körperfest zum Griff definiert ist, entspricht die Bewegung in jeder Winkellage des Griffes einer translatorischen x_h -Richtung nach ISO 10068:2012-12. Für eine theoretische Vorbetrachtung zur Konzeptionierung eines Hand-Arm Modells für die zur Unterarmachse drehende Bewegung kann somit der in Bild 7-2 dargestellte Modellansatz eines am Angriffspunkt der Hand angreifenden translatorischen Hand-Arm Modells, das in seiner Orientierung körperfest zum Griff definiert ist, zu Grunde gelegt werden.

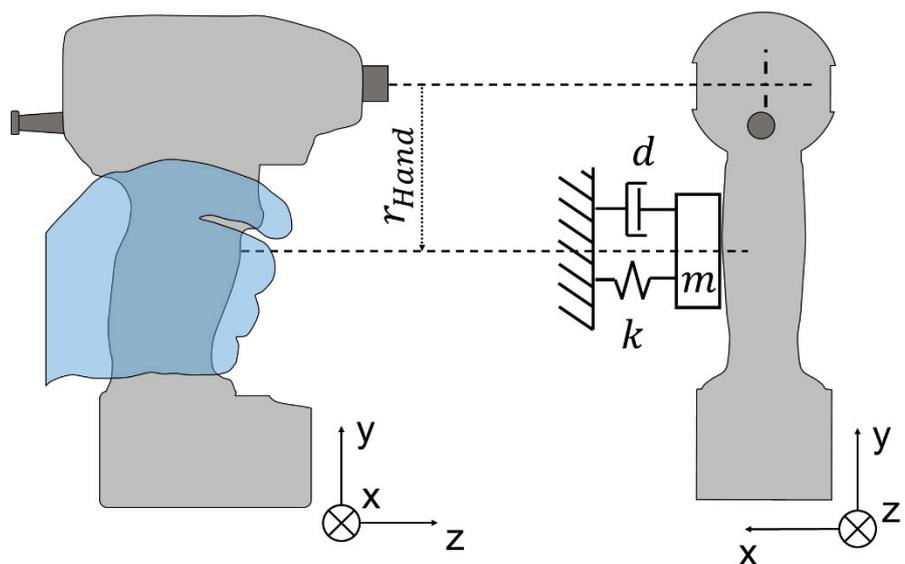


Bild 7-2: Mehrmassen-Schwinger Ansatz zur Konzeptionierung eines Hand-Arm Modells für die zur Unterarmachse drehende Bewegung

Das dargestellte Einmassen-Schwinger Modell steht hierbei symbolisch für alle anderen Arten von Mehrmassen-Schwingern mit beliebiger Anzahl von Freiheitsgraden. Gültigkeit besitzt der Ansatz, solange diese Modelle ihren Masseschwerpunkt nur auf der x-Achse verschoben am Angriffspunkt der Hand aufweisen und stets orthogonal zum Griff orientiert sind.

7.1.2 Vorgehen zur Optimierung eines Referenzmodells zur Nutzung am Impulsschraubengriff

Als Ausgangsbasis der Analyse, ob ein Modell mit wenig Freiheitsgraden durch justierbare Parameter in der Lage ist, die auftretenden heterogenen passiven Anwendereigenschaften abzubilden, dient das in Abschnitt 2.3.6.3 vorgestellte Zweimassen-Schwinger Modell der ISO 10068:2012-12 im grifforientierten Koordinatensystem (vgl. Bild 7-2 und Bild 2-30). Um eine Berechnung der Impedanz in Betrag und Phase über der Frequenz zu ermöglichen, bedient sich diese Arbeit der mechanischen Schaltungsstruktur nach SEIDEL¹⁹³. Die dem Modell der ISO 10068:2012-12 entsprechende Schaltungsstruktur wurde bereits in Abschnitt 2.3.7 vorgestellt. Mit Gl. 2-12 ergibt sich Betrag $|\underline{Z}_{ist}(\omega)|$ und Phase $\angle \underline{Z}_{ist}(\omega)$ nach Gl. 2-4 und Gl. 2-5 für jede gesuchte Kreisfrequenz ω für den Zweimassen-Schwinger.

Im nächsten Schritt werden die Parameter des Modells iterativ durch einen Optimierer angepasst. In dieser Arbeit wird die Optimierungsfunktion „fmincon“ der MATLAB® Optimization toolbox verwendet. Das Vorgehen entspricht hierbei dem in Bild 7-3 dargestellten Algorithmus.

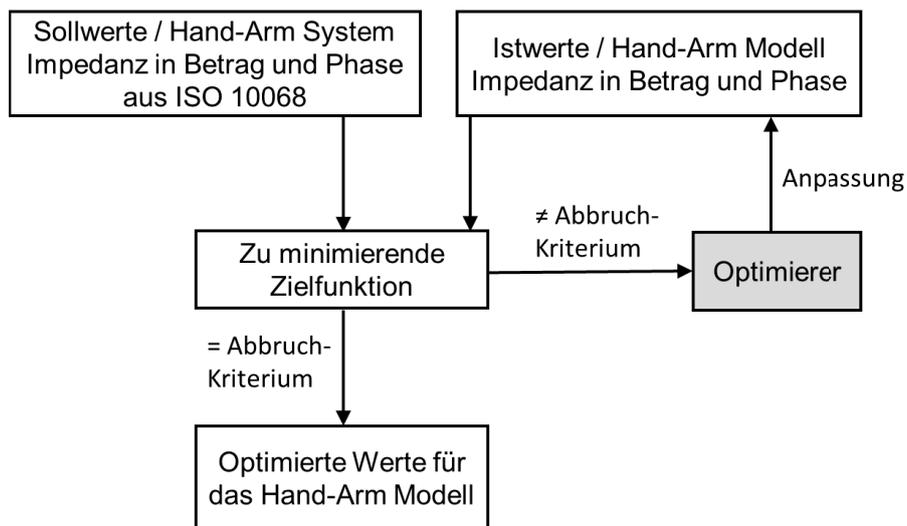


Bild 7-3: Algorithmus zur Optimierung der Parameter des Zweimassen-Schwingers zur Anpassung an die ISO 10068:2012-12

¹⁹³ vgl. Seidel 2001

Als zu minimierende Zielfunktion wird Gl. 7-1 genutzt. Durch den Optimierer wird die relative Abweichung des Istwertes zum Sollwert von Betrag und Phase minimiert.

$$f(\underline{Z}_{ist}) = \sum_{\omega=\omega_1}^{\omega_n} \left(\sqrt{\frac{(|\underline{Z}_{soll}(\omega)| - |\underline{Z}_{ist}(\omega)|)^2}{|\underline{Z}_{soll}(\omega)|^2}} + \sqrt{\frac{(\angle \underline{Z}_{soll}(\omega) - \angle \underline{Z}_{ist}(\omega))^2}{\angle \underline{Z}_{soll}(\omega)^2}} \right) \cdot G(\omega) \rightarrow \min! \quad \text{Gl. 7-1}$$

Innerhalb des Abschnitts 6.5 konnte gezeigt werden, dass der Betrag der Impedanz in den durchgeführten Versuchen fast im gesamten Bereich der in ISO 10068:2012-12 angegebenen Grenzen variierte. Weiter konnte gezeigt werden, dass auch die gemessene Phase der Impedanz beinahe über dem gesamten Bereich innerhalb der angegebenen Grenzen der ISO 10068:2012-12 liegen kann¹⁹⁴. Die erhobenen Daten bilden jedoch nur die Impedanz des Hand-Arm Systems bei einer einzigen Frequenz ab. Es ist nicht zielführend, ein Modell zu erstellen, welches nur exakt bei dieser Frequenz Gültigkeit hat. Durch Einflüsse aus dem gesamten Super-System „Power-Tool“ (vgl. Abschnitt 2.1) kann es zu Frequenzschwankungen kommen. Es ist somit ratsam, neben der Impedanz bei der Hauptgerätefrequenz zumindest auch den engen Bereich um diese Hauptgerätefrequenz zu betrachten. Im Sinne der Verallgemeinerbarkeit wird innerhalb der Arbeit soweit möglich immer ein möglichst großer Bereich betrachtet. Es ist somit möglich, die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere, dem Impulsschrauber ähnliche, Power-Tools abzuschätzen, welche in den jeweils angegebenen Frequenzgrenzen mit dem Anwender interagieren. Das beschriebene Vorgehen ist im Allgemeinen aber auch auf jede beliebige Hauptfrequenz eines drehend anregenden Power-Tools anwendbar, sofern die Impedanzen in Betrag und Phase in Abhängigkeit der Frequenz vorliegen.

$\underline{Z}_{soll}(\omega)$ wird somit durch die mittlere Impedanz und deren obere und untere Abweichungsgrenze nach ISO 10068:2012-12 definiert. $\underline{Z}_{ist}(\omega)$ lässt sich über Gl. 2-12 bestimmen. Über Gl. 2-6 - Gl. 2-8 wird Gl. 7-1 hierbei zur Funktion der zu optimierenden Parameter des Modells $f_{(d_1, k_1, m_1, d_2, k_2, m_2)}$. Der innerhalb dieser Arbeit als Beispielsystem genutzte Impulsschrauber regt das Hand-Arm System, wie in Abschnitt 6.1.2 gezeigt, mit einer Hauptfrequenz von ca. 23 Hz an. Nach Abschnitt 5.1 wirken hierbei die größten Beanspruchungen auf die Komponenten innerhalb eines

¹⁹⁴ Die gemessenen Phasen außerhalb der Grenzen der ISO 10068:2012-12 konnten innerhalb der Arbeit bei der Auslegung des Hand-Arm Modells nicht betrachtet werden, da zum Zeitpunkt der Untersuchung entsprechende Daten noch nicht vorlagen.

Power-Tools. Da innerhalb der Arbeit insbesondere die Abbildung des Anwenders in der Prüftechnik zur beanspruchungsäquivalenten Validierung von Power-Tools im Fokus steht, soll das Hand-Arm Modell im Bereich um die 23 Hz besonders genaue Vorhersagen der Impedanz treffen können. $G(\omega)$ bildet eine Frequenzgewichtungsfunktion ab, die den entsprechenden Frequenzbereich hervorhebt und ist wie folgt definiert:

$$G(\omega) = \begin{cases} 1 & \omega < 10 \text{ Hz} \cdot 2\pi \\ 10 & 10 \text{ Hz} \cdot 2\pi \leq \omega \leq 30 \text{ Hz} \cdot 2\pi \\ 1 & \omega > 30 \text{ Hz} \cdot 2\pi \end{cases} \quad \text{Gl. 7-2}$$

Die Abweichungen im Bereich zwischen 10 Hz und 30 Hz (also in der Nähe der Gerätehauptfrequenz) werden hierdurch um den Faktor 10 höher gewichtet als die Abweichungen im restlichen Frequenzspektrum. Aus obiger Überlegung der Übertragbarkeit auf andere Power-Tools wird $\omega_n = 2\pi \cdot 100 \text{ Hz}$ und $\omega_1 = 2\pi \cdot 10 \text{ Hz}$ (untere Frequenzgrenze der Werte in ISO 10068:2012-12) gewählt. Um ein physikalisch sinnvolles Ergebnis zu erzeugen, werden für die Optimierung noch folgende Randbedingungen definiert:

$$d_1, k_1, m_1, d_2, k_2, m_2 \geq 0 \quad \text{Gl. 7-3}$$

Als Optimierer wird, wie oben erwähnt, die Optimierungsfunktion „fmincon“ der MATLAB® Optimization toolbox gewählt. Als Abbruchkriterium wird empirisch¹⁹⁵ die Abweichung der Zielfunktion von null mit $1 \cdot 10^{-6}$ zugrunde gelegt.

7.1.3 Optimierte Referenzmodell zur Nutzung am Impulsschraubengriff

In Bild 7-4 ist der Verlauf der Impedanz über der Frequenz nach ISO 10068:2012-12 in Betrag und Phase in x_h -Richtung aufgetragen. Die oberen und unteren angegebenen Abweichungsgrenzen sind als strichpunktierte Linie aufgetragen. Der Durchschnittswert ist jeweils als durchgezogene Linie eingezeichnet. Die vom optimierten Modell vorhergesagten Impedanzen in Betrag und Phase mit den verschiedenen optimierten Parametersätzen sind jeweils mit Kreuzmarkierungen dargestellt.

¹⁹⁵ Das Abbruchkriterium wurde solange optimiert, bis zur ISO 10068:2012-12 vergleichbare Ergebnisse erzielt werden konnten.

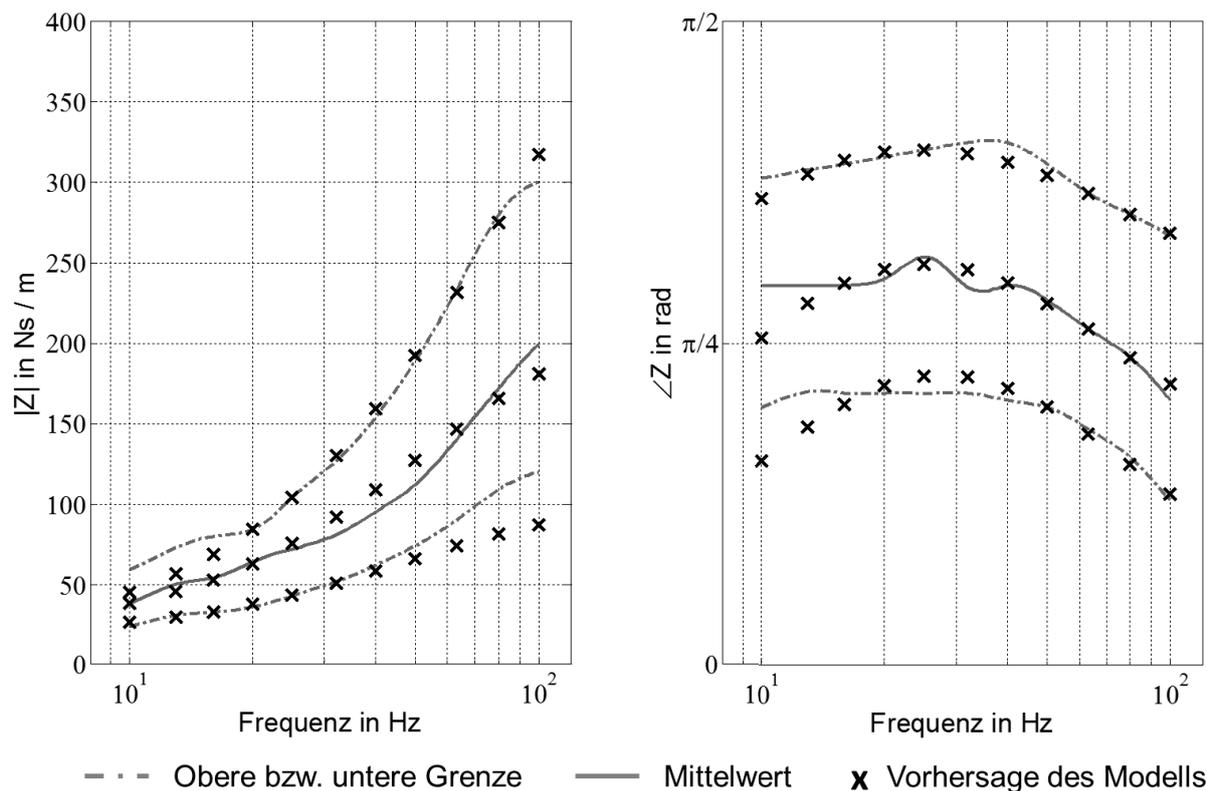


Bild 7-4: Impedanz und deren obere und untere Abweichungsgrenze des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase nach ISO 10068:2012-12 und Vorhersage der entsprechenden Werte durch das Hand-Arm Modell mit optimierten Parametersätzen

Betrag und Phase werden durch das Modell besonders im Bereich um 23 Hz sowohl bezüglich der Werte als auch im Verlauf sehr gut abgebildet. Die Vorhersagequalität bei der mittleren Impedanz nach ISO 10068:2012-12 konnte in der Phase durch die angepasste Optimierung gegenüber dem angegebenen Modell aus ISO 10068:2012-12 noch verbessert werden. Auffällig ist die Abweichung des Modells unterhalb 20 Hz bei der Abbildung der oberen Abweichungsgrenze nach ISO 10068:2012-12. Diese Abweichung kann nur korrigiert werden, indem der Bereich zwischen 30-100 Hz außer Acht gelassen wird. Die Struktur des Modelles setzt hier Grenzen, die keine weitere Optimierung zulassen. Für die hier betrachtete Anwendung wird die Abweichung zu Gunsten der guten Abbildbarkeit der Frequenzen über 20 Hz akzeptiert.

Es lässt sich feststellen, dass ein Zweimassen-Schwinger Modell durch justierbare Parameter in der Lage ist, die auftretenden heterogenen passiven Anwendereigenschaften abzubilden. Die zugehörigen Parameter des Hand-Arm Modells lassen sich Tabelle 7-1 entnehmen. Neben den Parametern zur Optimierung der Impedanz des Modells auf die Mittelwerte nach ISO 10068:2012-12 sind die Parameter für die obere bzw. untere Abweichungsgrenze der Impedanz nach ISO 10068:2012-12 angegeben.

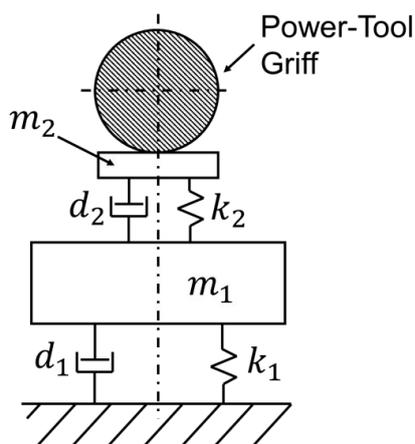


Bild 7-5: Zweimassen-Schwinger Modell zur Abbildung der Heterogenität der Impedanz des Hand-Arm Systems nach ISO 10068:2012-12

Tabelle 7-1: Parameter des theoretischen Zweimassen-Schwinger Modells zur Abbildung der Heterogenität der Impedanz des Hand-Arm Systems nach ISO 10068:2012-12

	Untere Grenze	Mittelwert	Obere Grenze
m1 in kg	0,337	0,501	0,499
m2 in kg	0	0,048	0,204
k1 in N/m	0	0	0
k2 in N/m	0	0	0
d1 in Ns/m	27,15	26,22	17,05
d2 in Ns/m	100,69	200,56	311,36

7.2 Zwischenfazit zur theoretischen Vorbetrachtung für die Abbildung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in physischen Modellen am Impulsschrauber

Um die Aussagequalität der Validierung von handgehaltenen Geräten in der Entwicklung zu erhöhen, werden Prüfstände eingesetzt. Um einer Entwicklung entgegenzuwirken, welche auf ein einziges Anwendermodell optimiert ist, müssen die Anwendermodelle in Prüfständen im anwendungsspezifischen Rahmen ein- bzw. verstellbar sein¹⁹⁶. Das Hand-Arm Modell, als Teil des Anwendermodells, muss sich auf die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften einstellen lassen. Aus dem Stand der Forschung ist bekannt, dass die passiven Anwendereigenschaften durch die Modellierung der Impedanz in Betrag und Phase mit Mehrmassen-Schwingern darstellbar sind. Je höher die Anzahl der Freiheitsgrade, desto genauer die Vorhersage der Impedanz und desto schwieriger die physische Umsetzung. In Abschnitt 7.1 dieser Arbeit wurde an einem dem Stand der Forschung entsprechenden translatorischen Zweimassen-Schwinger Modell erstmals gezeigt, dass dieses durch justierbare Parameter in der Lage ist, die heterogenen passiven Anwendereigenschaften nach ISO 10068:2012-12 abzubilden. Es konnte dargestellt werden, in welchem Rahmen die Parameter dieses Modells zu verändern sind, um die angegebenen Grenzen der heterogenen passiven Anwendereigenschaften

¹⁹⁶ vgl. Bruchmüller et al. 2015

abzubilden. Das Zweimassen-Schwinger Modell bietet einen guten Kompromiss aus Vorhersagegenauigkeit der Impedanz in Betrag und Phase über einen Frequenzbereich von 10-100 Hz und der Anzahl der benötigten Freiheitsgrade. Bezugnehmend auf die erste Unterfrage der dritten Forschungsfrage aus Abschnitt 4.2 lässt sich hiermit Folgendes feststellen:

Forschungsfrage 3: Physische Modellierung der passiven Anwendereigenschaften

Können Black-Box-Modellierungsansätze aus dem Stand der Forschung genutzt werden, um die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften abzubilden?

Die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften, die sich durch die Impedanz in Betrag und Phase quantifizieren lassen, kann durch einen Black-Box-Modellierungsansatz aus dem Stand der Forschung dargestellt werden. Die Heterogenität in dem für Impulsschrauber relevanten Frequenzbereich von 10 - 100 Hz lässt sich durch ein Zweimassen-Schwinger Modell (mit Ausnahme der oberen Grenze des Betrages der Impedanz nach ISO 10068:2012-12 unter 20 Hz) gut abbilden.

Anhand der Parameter in Tabelle 7-1 kann nachvollzogen werden, dass ein physischer Aufbau mit den angegebenen Parametern nur schwierig realisierbar ist. Die Abbildung von d_2 bei einer Masse von lediglich 48 Gramm scheint nur durch eine weiche Struktur wie beispielsweise ein Elastomer möglich. Eine gleichzeitige Federrate von null ist jedoch durch kein Material erreichbar. Des Weiteren lassen sich durch den Einsatz von Elastomeren nur schwierig lineare Kennlinien erzeugen, wie diese vom physikalischen Modell gefordert werden. Zudem ergibt sich die Herausforderung der ebenfalls geringen Masse m_1 . Eine physische Realisierbarkeit gerade im Hinblick auf massebehaftete Lagerungen und Federn bzw. Dämpferbauteile ist nur schwer denkbar. Eine wichtige physikalische Randbedingung beim Aufbau von Prüfständen wird zudem durch die Federkonstanten verletzt. Bei der Federkonstante „null“ kann das Modell keinen statischen Kräften entgegenwirken. Jeder Schrauber weist jedoch neben dem hohen dynamischen Drehmoment immer ein, wenn auch kleines, statisches Moment auf, dem entgegengewirkt werden muss. In Summe lässt sich deshalb feststellen, dass der Aufbau eines physischen Modells mit den gefundenen Parametern nicht gelingen kann. Hierfür ist eine weitere Optimierung unter der Randbedingung realisierbarer Parameter notwendig. Neben den angesprochenen Problemen ist auch die Definition des Hand-Arm Modells in griffester Orientierung (das Modell müsste sich bei der Anregung im Raum um die z-Achse mitdrehen) für eine physische Realisierung ungeeignet.

Im nächsten Abschnitt wird eine Methode zur Lösung dieser Herausforderung entwickelt.

7.3 Ableitung von rotatorisch wirkenden Hand-Arm Modellen auf Basis translatorischer Modelle (Methodenentwicklungsphase)

In der Analysephase konnten, äquivalent zum Stand der Forschung, mehrere Herausforderungen bei der Umsetzung von theoretischen Hand-Arm Modellen in physische Hand-Arm Modelle identifiziert werden. Innerhalb dieses Abschnittes wird eine Methode entwickelt, um theoretische Hand-Arm Modelle für Power-Tools mit einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung in physische Hand-Arm Modelle zu überführen. Die innerhalb dieses Abschnittes vorgestellten Ergebnisse wurden in enger Zusammenarbeit mit ZUMSTEIN¹⁹⁷ entwickelt und werden hier im Kontext zu dieser Arbeit aufbereitet vorgestellt. Wesentliche Abschnitte wurden bereits in MATTHIESEN ET AL.¹⁹⁸ veröffentlicht.

7.3.1 Methode zur Überführung von translatorischen Hand-Arm Modellen in rotatorische Modelle zur Abbildung der passiven Anwendereigenschaften

Eine wesentliche Herausforderung bei der Erstellung physischer Hand-Arm Modelle stellt sich durch die Forderung nach sehr kleinen Massen. Innerhalb dieser Massen müssen sich Federsteifigkeiten, Dämpfungskonstanten und Lagerungen realisieren lassen. Gemäß dem Stand der Forschung führt dieser Umstand in translatorischen Hand-Arm Modellen zu großen Modellgenauigkeiten. Im Falle des hier zu entwickelnden einstellbaren Hand-Arm Modells zur Abbildung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften für periodisch anregende Power-Tools in einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung kommt noch die Herausforderung der Verstellbarkeit der Parameter hinzu, welche mit einer zusätzlichen Gewichtserhöhung einhergeht. Nicht zuletzt stellt die griffeste Orientierung des bis hierhin genutzten translatorischen Hand-Arm Modells eine große Herausforderung der Modellierung im derzeitigen Stand der Forschung dar.

Um die beschriebenen Herausforderungen zu lösen, wird die in Bild 7-6 illustrierte Methode zur Ableitung eines Hand-Arm Modells für die passiven Anwendereigenschaften bei periodisch anregenden Power-Tools in einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung auf Basis translatorischer Modelle entwickelt.

¹⁹⁷ vgl. Zumstein 2016 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

¹⁹⁸ vgl. Matthiesen et al. 2016a

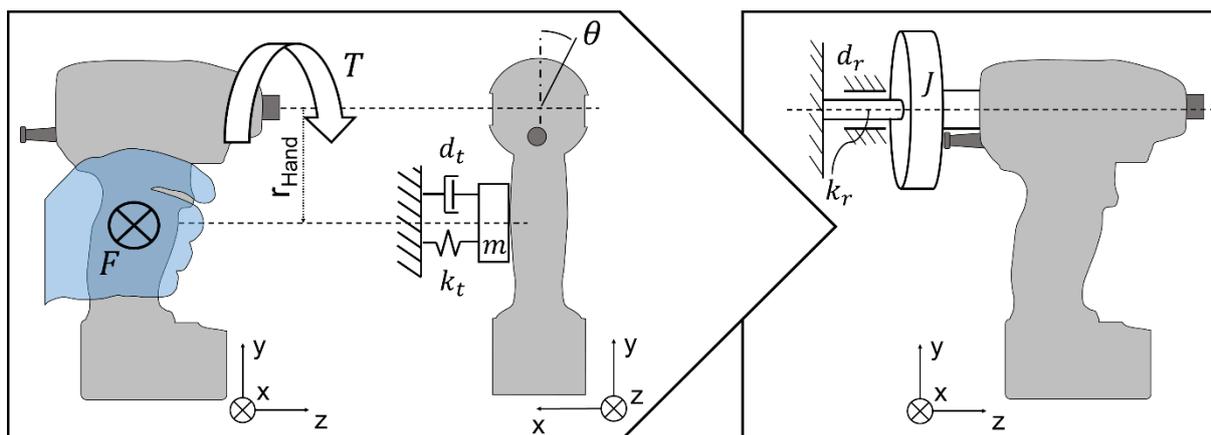


Bild 7-6: Methode zur Ableitung eines Hand-Arm Modells für periodisch anregende Power-Tools in einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung auf Basis translatorischer Modelle der passiven Anwendereigenschaften

Kernidee der Methode ist, dass sich vom Betrag her kleine translatorisch wirkende Massen physisch einfacher durch äquivalent wirkende Massenträgheitsmomente realisieren lassen. Es liegt somit eine Überführung von translatorischen Modellen in rotatorische Modelle zu Grunde. Hierdurch lassen sich auch Lagerungen durch Radiallager realisieren, die im Vergleich zu Linearlagern kleinere Trägheiten aufweisen. Von großem Nutzen ist zudem der Wegfall der Herausforderungen durch die griffeste Orientierung des translatorischen Modells.

Wie bereits in Kapitel 6 dieser Arbeit vorgestellt, wird die Summe der Kräfte zwischen Griff und Hand auf eine Punktkraft F reduziert. Die Kraft wirkt dem Schraubmoment T und der daraus resultierenden Drehung um die Schrauber-Achse entgegen. Die modellierte Kraft greift im Handmittelpunkt in einem Abstand r_{Hand} zur Schrauber-Achse an. Ein translatorisches Hand-Arm Modell mit einem Freiheitsgrad wird als Modell an gleicher Stelle angekoppelt und soll in Interaktion eine gleiche Kraft F bei gleicher Auslenkung x und deren zeitlichen Ableitungen \dot{x} und \ddot{x} (jeweils im zum Griff orientierungsfesten Koordinatensystem) auf den Griff aufbringen. Diese Kraft F hängt dabei von der Masse m , der Federsteifigkeit k_t und der Dämpfungskonstante d_t des Modells ab. Es gilt:

$$T = F \cdot r_{Hand} \quad \text{mit} \quad F = m \cdot \ddot{x} + d_t \cdot \dot{x} + k_t \cdot x \quad \text{Gl. 7-4}$$

Für ein rotatorisches Hand-Arm Modell, das gleiche Momente hervorruft, gilt mit der Rotationsträgheit J und dem Drehwinkel θ :

$$T = J \cdot \ddot{\theta} + d_r \cdot \dot{\theta} + k_r \cdot \theta \quad \text{Gl. 7-5}$$

Zwischen der Auslenkung eines im Griffkoordinatensystem orientierten Koordinatensystems und den Winkeln besteht der Zusammenhang (x ist eine Kreisbogenbewegung):

$$x = \theta \cdot r_{Hand}; \quad \dot{x} = \dot{\theta} \cdot r_{Hand} \quad \text{und} \quad \ddot{x} = \ddot{\theta} \cdot r_{Hand} \quad \text{Gl. 7-6}$$

Gl. 7-4 lässt sich hierdurch auch schreiben als:

$$T = m \cdot r_{Hand}^2 \cdot \ddot{\theta} + d_t \cdot r_{Hand}^2 \cdot \dot{\theta} + k_t \cdot r_{Hand}^2 \cdot \theta \quad \text{Gl. 7-7}$$

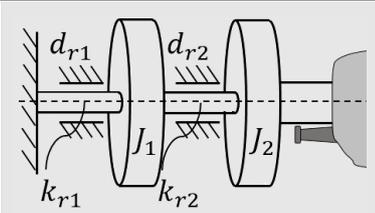
Der Koeffizientenvergleich zwischen Gl. 7-5 und Gl. 7-7 liefert:

$$J = m \cdot r_{Hand}^2; \quad d_r = d_t \cdot r_{Hand}^2 \quad \text{und} \quad k_r = k_t \cdot r_{Hand}^2 \quad \text{Gl. 7-8}$$

Der Zusammenhang lässt sich äquivalent für jede Masse, jeden Dämpfer und jede Feder eines seriell geschalteten Modells mit mehreren Freiheitsgraden wie beispielsweise einem Zweimassen-Schwinger zeigen.

Durch Anwendung der hergeleiteten Beziehungen lässt sich Tabelle 7-1 in Tabelle 7-2 überführen:

Tabelle 7-2: Parameter des weiterentwickelten theoretischen rotatorischen Zweimassen-Schwinger Modells zur Abbildung der Heterogenität der Impedanz des Hand-Arm Systems nach ISO 10068:2012-12

	Untere Grenze	Mittelwert	Obere Grenze
J_1 in kgm^2	0,00232	0,00345	0,00689
J_2 in kgm^2	0	0,00033	0,00141
k_{r1} in Nm/rad	0	0	0
k_{r2} in Nm/rad	0	0	0
d_{r1} in Nms/rad	0,18704	0,18063	0,11746
d_{r2} in Nms/rad	0,69365	1,38166	2,14496

Trotz Transformation zur Rotationsmasse sind die Massen weiterhin verhältnismäßig klein, jedoch im Falle J_1 , nicht weit von realisierbaren Größenordnungen entfernt. Zu beachten ist hierbei die geforderte, relativ hohe Einstellbarkeit mit einer Verdreifachung der Rotationsmasse. Die Rotationsmasse $J_2 = 0$ ist hingegen nicht realisierbar. Auch die beiden weiteren errechneten Fälle für die Rotationsmasse J_2 fallen sehr klein aus. Eine Einstellbarkeit in diesen Größenordnungen ist nur schwierig zu realisieren. Wie Tabelle 7-2 weiter zu entnehmen ist, müssen sich optimaler Weise

beide Dämpfer im angegebenen Rahmen verstellen lassen, um die Abbildung der Anwenderheterogenität in den untersuchten Bereichen zu ermöglichen. Es wird nahezu eine Verdreifachung des Dämpferwertes d_{r2} benötigt. Wünschenswert ist in allen Parametern eine stufenlose Einstellbarkeit ohne Austausch von Komponenten.

Wie bereits in Abschnitt 7.2 festgestellt, stellt sich im theoretischen Hand-Arm Modell eine bislang ungelöste Herausforderung durch die optimalen Federraten von null. Diese lassen sich in einem physischen Modell nicht umsetzen, da Schrauber immer einen gewissen statischen Drehanteil aufweisen bzw. die Integration der Momentenstöße zu einem statischen Moment führt. Anhand der in Kapitel 6 durchgeführten Versuche, kann durch die beobachtete Auslenkung des Schraubers bei verschiedenen aufgebrachten Gewichten geschlossen werden, dass das gemittelte wirkende Moment maximal 1 Nm beträgt. Die Feder muss diesem Moment bei einer vertretbaren statischen Auslenkung entgegenwirken. Die mögliche statische Auslenkung hängt hierbei jedoch von der konkreten physischen Umsetzung des Hand-Arm Modells ab.

7.3.2 Methode zur physischen Umsetzung des Hand-Arm Modells und dessen Komponenten zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften

Die Überführung des theoretischen Hand-Arm Modells in ein physisches Hand-Arm Modell erfolgt durch den in Bild 7-7 dargestellten iterativen Prozess.

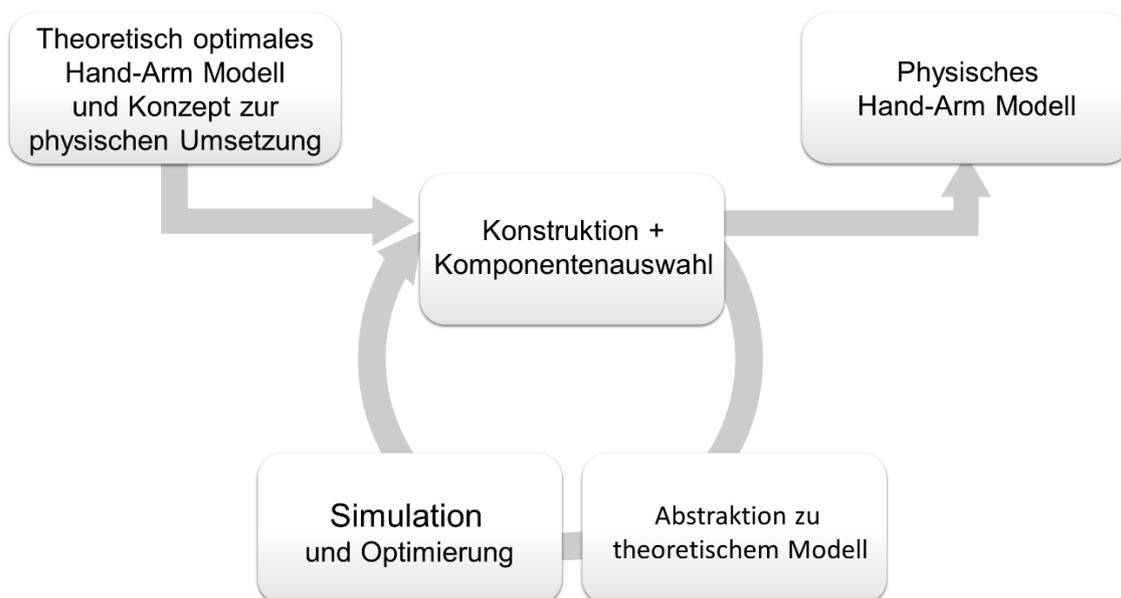


Bild 7-7: Iterativer Prozess zur Überführung des theoretischen Hand-Arm Modells in ein physisches Hand-Arm Modell

Aus dem zuvor in Abschnitt 7.3.1 entwickelten und theoretisch optimalen Hand-Arm Modell wird zunächst ein Konzept zur physischen Umsetzung abgeleitet. Auf Basis

dieses Konzeptes werden Komponenten zur Abbildung der Dämpfung und Steifigkeit des Stands der Technik gewählt oder entwickelt und zusammen mit nötigen Strukturen in eine Konstruktion für das Hand-Arm Modell überführt. Aus dieser Konstruktion lassen sich die entstehenden Massen ableiten und zusammen mit den erreichbaren Dämpfungs- und Steifigkeitswerten in ein neues erreichbares theoretisches Mehrkörper-Modell überführen. Durch die nötige Veränderung der Masse und der Dämpfungs- und Steifigkeitswerte bei der konstruktiven Umsetzung ist eine erneute Optimierung der Modellparameter sinnvoll. Die optimierten Parameter bieten wiederum eine Grundlage für eine optimierte Konstruktion. Bei zufriedenstellender Abweichung zwischen vorhergesagten und zu erreichenden Impedanzen über der Frequenz wird der iterative Prozess verlassen.

7.4 Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften in einem physischen Modell auf Basis eines theoretischen Modells (Methodenanwendungsphase)

Die nachfolgend vorgestellte physische Umsetzung des Hand-Arm Modells ist in enger Zusammenarbeit mit ZUMSTEIN¹⁹⁹ entstanden und basiert auf den in Abschnitt 7.3 entwickelten Methoden und dem beschriebenen theoretischen Hand-Arm Modell aus Abschnitt 7.3.1 (vgl. Tabelle 7-2). Das Konzept wurde in MATTHIESEN ET AL.²⁰⁰ publiziert. Innerhalb dieser Arbeit wird das iterative Vorgehen (vgl. Bild 7-7) aus Komponentenauswahl, Konstruktion und Simulation nicht dargestellt. Alternative verworfene Konzepte für die ausgewählten Komponenten können ZUMSTEIN²⁰¹ und HIRLING²⁰² entnommen werden.

7.4.1 Realisierung der einstellbaren Dämpfung

Eine Kernanforderung bei der Realisierung der einstellbaren Dämpfung ist die Leerhubfreiheit (ohne Schlupf) des Dämpfers auch bei kleinsten Bewegungen. Es ergibt sich ansonsten bei jedem Nulldurchgang der Geschwindigkeit bei einer Schwingung eine unstetige Kennlinie, die nicht mit dem theoretischen Modell eines Dämpfers einhergeht. Einige Bauarten scheiden deshalb durch das Prinzip bedingt aus. Aus Gründen der Minimierung der Trägheiten ist ein direkt in Rotationsrichtung wirkender Dämpfer zu bevorzugen. Entscheidendes Kriterium ist die Einstellbarkeit der Dämpfungskonstanten im durch das Modell geforderten Bereich. Wünschenswert ist zudem im Kontext dieser Arbeit die einfache manuelle Verstellbarkeit der Dämpfer an

¹⁹⁹ vgl. Zumstein 2016 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

²⁰⁰ vgl. Matthiesen et al. 2016a

²⁰¹ vgl. Zumstein 2016 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

²⁰² vgl. Hirling 2014 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

einem einfach zugänglichen Bedienelement. Ein Dämpfermodell, das diesen Anforderungen nach Datenblatt weitestgehend entspricht, ist der in Bild 7-8 dargestellte fluidische Rotationsdämpfer KD-A des Herstellers Kinetrol.



Bild 7-8: Fluidische Rotationsdämpfer KD-A und Schemazeichnung des Dämpfungskonzeptes KINETROL LTD.²⁰³

Die Dämpfung wird durch rotierende Flügel erreicht, welche ein Silikonfluid durch die verstellbare Öffnung innerhalb stehender Flügel pressen. Die Dämpfer sind beidseitig wirkend, jedoch ist ihre Bauform im maximalen Auslenkungswinkel begrenzt. Der Arbeitswinkel beträgt beim gewählten Modell insgesamt 60° um die Neutrallage. Die Dämpfungskonstante der beiden in Frage kommenden Dämpfer kann nach Datenblatt zwischen $0,09\text{--}1,13\text{ Nms/rad}$ (Version A1) und $1,13\text{--}11\text{ Nms/rad}$ (Version A2) über einen rückseitigen Drehknopf anhand einer Skala eingestellt werden. Die Wertespanssen liegen somit in vergleichbaren Spannen zu den theoretisch optimalen Werten aus Tabelle 7-2.

7.4.2 Realisierung der einstellbaren Federsteifigkeit

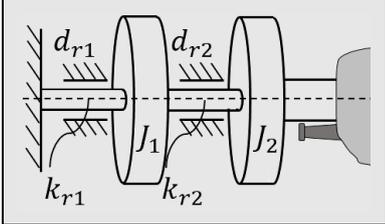
Es wurde bereits festgestellt, dass das gemittelte wirkende Moment des Schraubers maximal 1 Nm beträgt. Die Drehfedern müssen in einem physischen Aufbau diesem Drehmoment ausreichend entgegenwirken. Der gewählte fluidische Dämpfer hat einen Arbeitswinkel von insgesamt 60° um die Neutrallage. Da das Hand-Arm Modell für beide Drehrichtungen des Schraubers nutzbar sein soll, ist der Einbau des Drehdämpfers in Nulllage sinnvoll. Es bleiben somit in beide Bewegungsrichtungen 30° Schwingweg. Um bei den vorliegenden Drehstößen nicht an die Auslenkungsgrenzen des Drehdämpfers zu stoßen wird, basierend auf theoretischen Vorbetrachtungen von ZUMSTEIN²⁰⁴, eine minimale Drehfedersteifigkeit von $4,8\text{ Nm/rad}$ festgelegt. Aus dem iterativen Prozess aus Konstruktion und Simulation nach Bild 7-7

²⁰³ Kinetrol Ltd. 2018

²⁰⁴ vgl. Zumstein 2016 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

ergibt sich durch die Quantisierung der Dämpfung (durch am Markt verfügbare Dämpfermodelle) und durch die notwendigen massebehafteten Strukturen (um diese in einem Hand-Arm Modell schwingend zu lagern) entgegen der Grundanforderung aus Tabelle 7-2 (keine Federsteifigkeit erforderlich), die Notwendigkeit, die Federsteifigkeit zu verstellen. MATTHIESEN ET AL.²⁰⁵ geben diese Einstellungsbereiche der Federsteifigkeit wie in Tabelle 7-3 dargestellt an.

Tabelle 7-3: Von MATTHIESEN ET AL.²⁰⁶ vorgeschlagene Einstellbereiche der Federsteifigkeit zur Abbildung der Heterogenität der Impedanz des Hand-Arm Systems nach ISO 10068:2012-12

	Untere Grenze	Mittelwert	Obere Grenze
k_{r1} in Nm/rad	8,3	5,0	5,0
k_{r2} in Nm/rad	5,0	15,0	15,0

Um diese Verstellung zu realisieren, wird das Prinzip der Verkürzung der aktiven Länge einer Drehfeder gewählt. Das Konzept ist in Bild 7-9 illustriert.

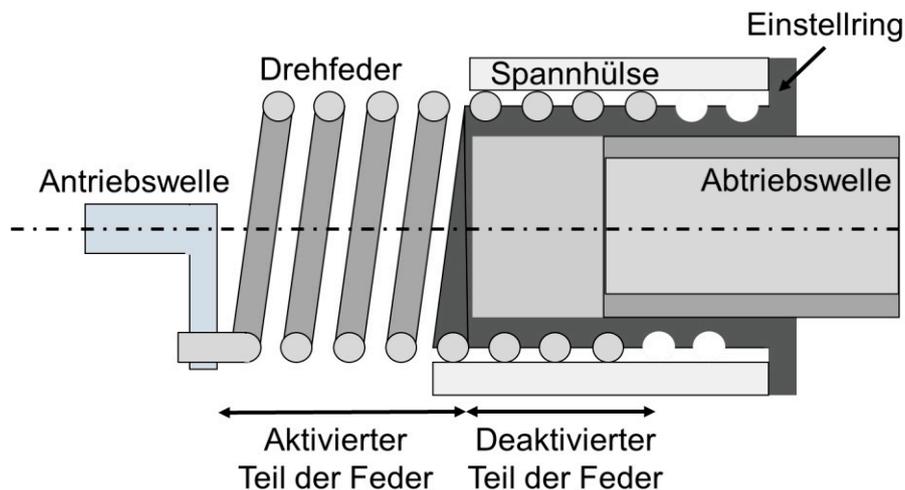


Bild 7-9: Konzept zur Realisierung der einstellbaren Federsteifigkeit nach MATTHIESEN ET AL.²⁰⁷ auf Basis von ZUMSTEIN²⁰⁸

²⁰⁵ vgl. Matthiesen et al. 2016a

²⁰⁶ vgl. Matthiesen et al. 2016a

²⁰⁷ vgl. Matthiesen et al. 2016a

²⁰⁸ vgl. Zumstein 2016 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

Der aktive Teil einer Spiralfeder kann durch das Auf- und Abdrehen der Feder auf einen Kern verkürzt oder verlängert werden. Es wird hierdurch der Anteil der offenen, an der Federarbeit beteiligten Windungen vergrößert oder verkleinert. Der deaktivierte Teil der Feder wird durch eine Spannhülse daran gehindert, sich im Bereich auf dem Kern zu bewegen. Je länger der aktive Teil der Feder über den Kern hinaussteht, desto weicher wird diese im System (Gesamtfedersteifigkeit sinkt). Die Veränderung der jeweils zur vorangehenden bzw. zur folgenden Rotationsmasse zuzuordnenden Masseanteile der Feder wird hierbei bei mittlerer Stellung vereinfacht als konstant betrachtet. Die Abweichungen sind vernachlässigbar.

7.4.3 Realisierung der einstellbaren Rotationsmasse

Das Konzept zur Verstellung der Trägheit ist in Bild 7-10 dargestellt.

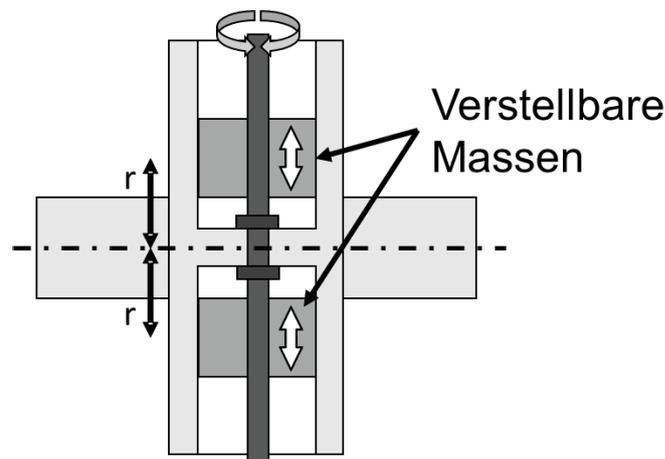


Bild 7-10: Konzept zur Realisierung des einstellbaren Massenträgheitsmoments nach MATTHIESEN ET AL.²⁰⁹ auf Basis von ZUMSTEIN²¹⁰

Im Gegensatz zu translatorischen Hand-Arm Modellen lässt sich das wirkende Massenträgheitsmoment bei rotatorisch wirkenden Hand-Arm Modellen verstellen, ohne die Masse selbst zu verändern. Im gewählten Konzept wird die Verstellung der Trägheit durch die Verstellung des radialen Versatzes der Masse von der Rotationsachse möglich. Hierfür werden die Massen symmetrisch durch eine Spindelschraube mit Links- und Rechtsgewinde von der Drehachse entfernt oder eingefahren.

Anhand Tabelle 7-2 ist einfach ersichtlich, dass eine Anpassung des Massenträgheitsmoments J_2 nicht zielführend sein kann. Die theoretische untere Grenze 0 kgm^2 ist konstruktiv offensichtlich nicht realisierbar. Ebenfalls stellen MATTHIESEN ET AL.²¹¹ fest, dass auch der Mittelwert von $0,00033 \text{ kgm}^2$ zu klein ist, um konstruktiv erreichbar zu sein. Nach konstruktiver Betrachtung liegt die unterste realisierbare Grenze bei $0,00034 \text{ kgm}^2$. Da hierbei jedoch noch keine Mechanik zur stufenlosen Verstellung der Rotationsmasse berücksichtigt ist, welche zu einer Erhöhung der Masse führen würde, wird von einer Einstellbarkeit des Massenträgheitsmomentes J_2 abgesehen. Die Einschränkungen, die sich hierdurch ergeben, müssen in der anschließenden Simulation evaluiert werden. Der Einstellbereich des Massenträgheitsmomentes J_1 nach Tabelle 7-2 liegt dagegen in

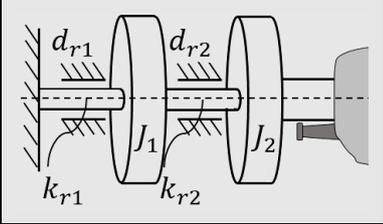
²⁰⁹ vgl. Matthiesen et al. 2016a

²¹⁰ vgl. Zumstein 2016 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

²¹¹ vgl. Matthiesen et al. 2016a

einem physisch realisierbaren Rahmen. MATTHIESEN ET AL.²¹² geben diese Einstellbereiche des Massenträgheitsmomentes wie in Tabelle 7-4 dargestellt an.

Tabelle 7-4: Von MATTHIESEN ET AL.²¹³ vorgeschlagene Einstellbereiche des Massenträgheitsmomentes J_1 zur Abbildung der Heterogenität der Impedanz des Hand-Arm Systems nach ISO 10068:2012-12

	Untere Grenze	Mittelwert	Obere Grenze
J_1 in kgm^2	0,0031	0,0034	0,0042
J_2 in kgm^2	0,00034	0,00034	0,00034

7.4.4 Konzept und konstruktive Umsetzung des Hand-Arm Modells zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften

Das aus den beschriebenen Komponenten erstellte Gesamtkonzept für das Hand-Arm Modell für periodisch anregende Power-Tools in einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung ist in Bild 7-11 neben dem schematischen Zweimassen-Schwinger Modell dargestellt.

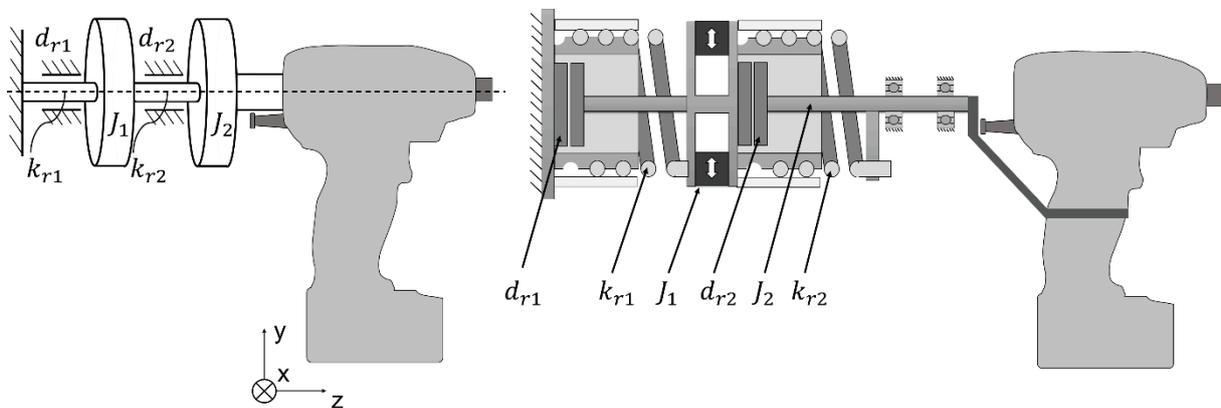


Bild 7-11: Gesamtkonzept für das Hand-Arm Modell für periodisch anregende Power-Tools in einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung am Beispiel des Impulsschraubers nach MATTHIESEN ET AL.²¹⁴ auf Basis von ZUMSTEIN²¹⁵

Das Konzept sieht auf der Seite des Schraubers eine radiale Fest-Los-Lagerstelle vor, um axiale Kräfte in das Gehäuse des Hand-Arm Modells ableiten zu können und um

²¹² vgl. Matthiesen et al. 2016a

²¹³ vgl. Matthiesen et al. 2016a

²¹⁴ vgl. Matthiesen et al. 2016a

²¹⁵ vgl. Zumstein 2016 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

zeitgleich unerwünschte radiale Bewegungen zu unterbinden. Der Schrauber wird in Höhe des Handangriffspunktes mit dem Hand-Arm Modell verbunden. Die Lagerung der Massen untereinander erfolgt über die Lagerung der Dämpfer. Das Gehäuse des Dämpfers d_{r2} ist dabei Teil der Rotationsmasse J_1 . Das Gehäuse des Dämpfers d_{r1} ist relativ zum Gehäuse raumfest. Der Verstell-Mechanismus der Steifigkeit k_{r2} ist ebenfalls der Rotationsmasse J_1 zuzuordnen, während der Verstell-Mechanismus der Steifigkeit k_{r1} raumfest ist. Die konstruktive Umsetzung ist mit Teilausbrüchen zur Darstellung der Funktion in Bild 7-12 abgebildet.

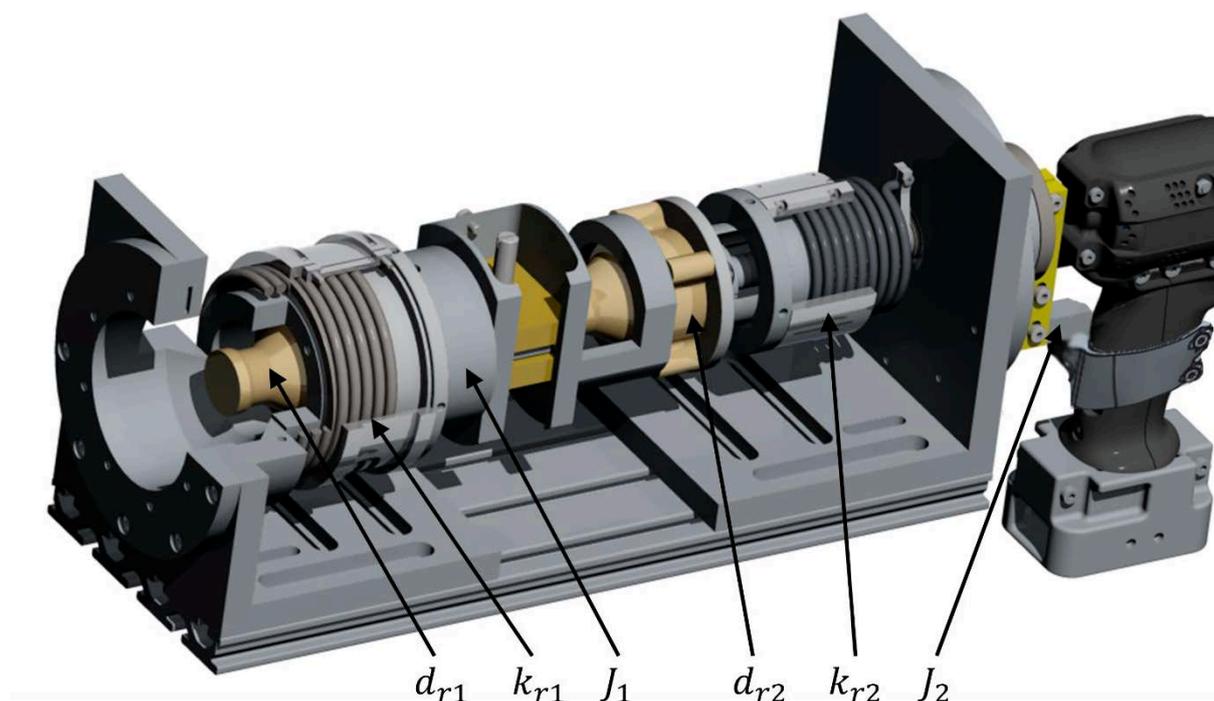


Bild 7-12: Konstruktive Umsetzung des Hand-Arm Modells für periodisch anregende Power-Tools in einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung auf Basis von ZUMSTEIN²¹⁶ mit Teilausbrüchen

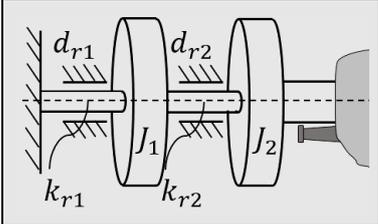
7.4.5 Theoretische erreichbare Variation der Impedanz des Hand-Arm Modells zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften

Das entwickelte Hand-Arm Modell bietet auf Basis der theoretischen Vorauslegung die in Tabelle 7-5 beschriebenen Einstellmöglichkeiten. Aus konstruktiven Gründen konnten nicht alle von MATTHIESEN ET AL.²¹⁷ vorgeschlagenen Wertebereiche im vollen Umfang umgesetzt werden.

²¹⁶ vgl. Zumstein 2016 (vom Autor co-betreute Masterarbeit)

²¹⁷ vgl. Matthiesen et al. 2016a

Tabelle 7-5: Theoretische Einstellbereiche des physischen rotatorischen Zweimassen-Schwinger Modells zur Abbildung der Heterogenität der Impedanz des Hand-Arm Systems nach ISO 10068:2012-12

	Einstellbereich
J_1 in kgm^2	0,0032-0,0038
J_2 in kgm^2	0,00034
k_{r1} in Nm/rad	5-10
k_{r2} in Nm/rad	5-15
d_{r1} in Nms/rad	0,09-1,13
d_{r2} in Nms/rad	1,13-11

Mit den möglichen Bereichen der Parameter kann nun analog zu Abschnitt 7.1.2 eine Optimierung der Parameter auf den Verlauf der Impedanz über der Frequenz nach ISO 10068:2012-12 in Betrag und Phase in x_h -Richtung erfolgen. Hierfür sind die Parameter vorab über Gl. 7-8 zurück zu transformieren. Um den Einstellbereich für den hier beispielhaft betrachteten Impulsschrauber zu untersuchen, wird bei ca. 23 Hz (Also in der Nähe der Gerätehauptfrequenz) die Gewichtungsfunktion extrem überhöht und wie folgt definiert:

$$G(\omega) = \begin{cases} 1 & \omega < 15 \text{ Hz} \cdot 2\pi \\ 1000 & 15 \text{ Hz} \cdot 2\pi \leq \omega \leq 25 \text{ Hz} \cdot 2\pi \\ 1 & \omega > 25 \text{ Hz} \cdot 2\pi \end{cases} \quad \text{Gl. 7-9}$$

Die Optimierung des Modells findet somit auf den Bereich zwischen 15 und 25 Hz statt, um die Impedanz über der Frequenz nach ISO 10068:2012-12 in Betrag und Phase in x_h -Richtung und deren Variation in diesem Bereich bestmöglich nachzubilden.

Der Verlauf der Impedanz über der Frequenz nach ISO 10068:2012-12 ist in Betrag und Phase für die x_h -Richtung in Bild 7-13 aufgetragen. Der Mittelwert ist jeweils als durchgezogene Linie und die oberen und unteren angegebenen Abweichungsgrenzen nach ISO 10068:2012-12 sind als strichpunktierte Linie aufgetragen. Mit Kreuzmarkierungen sind die vom Modell vorhergesagten Impedanzen in Betrag und Phase mit den verschiedenen optimierten Parametersätzen dargestellt.

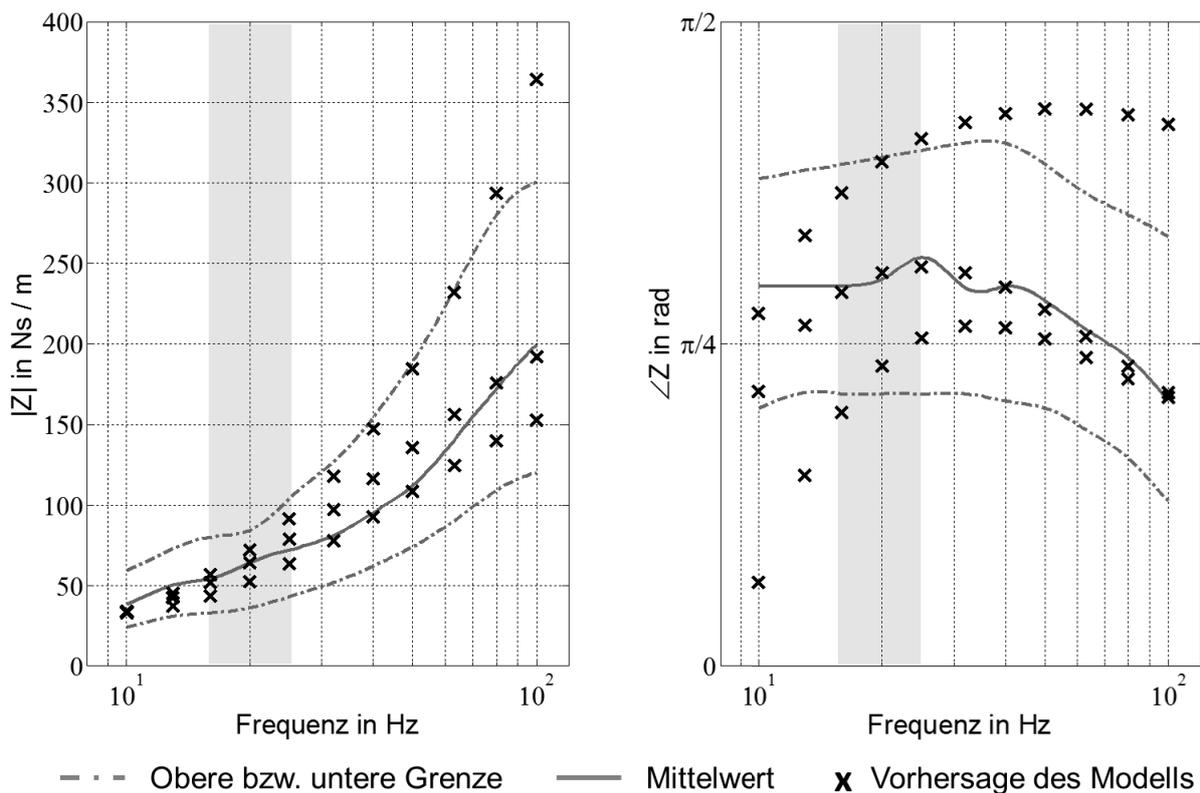


Bild 7-13: Impedanz und deren obere und untere Verteilungsgrenze des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase nach ISO 10068:2012-12 und theoretische Vorhersage der entsprechenden Werte durch das physische Hand-Arm Modell

Wenngleich etwa 50% der Heterogenität des Betrages der Impedanz durch das Modell abgebildet werden kann, ist die Variabilität des Betrages begrenzt. Zur besseren Abbildbarkeit müsste zumindest k_{r2} näher am theoretisch optimalen Wert liegen. Ohne Messungen am physisch aufgebauten System ist jedoch eine weitere Reduzierung der Federsteifigkeit nicht möglich, da der statische Anteil des Momentes noch genauer zu bestimmen ist. Für die Phase der Impedanz zeigt das Modell hingegen eine gute Vorhersagequalität im Bereich um 23 Hz.

7.5 Zwischenfazit zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften in einem physischen Modell auf Basis eines theoretischen Modells

Die wesentlichen Herausforderungen bei der Modellierung der passiven Anwendereigenschaften in physischen Modellen sind die Forderungen nach sehr kleinen Massen. Ebenso sind die Realisierung einer weitgehenden Spielfreiheit in Schwingungsrichtung bei gleichzeitiger Beschränkung der festzuhaltenden Freiheitsgrade und die grifffeste Orientierung des Hand-Arm Modells Herausforderungen, die einen physischen Aufbau bei rotierend anregenden Geräten

stark erschweren. Mittels der in Abschnitt 7.3.1 entwickelten Methode, um theoretische translatorische Hand-Arm Modelle in physische Hand-Arm Modelle für Power-Tools mit einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung zu überführen, konnten einige der größten Herausforderungen des Stands der Forschung gelöst werden. Durch die Transformation von Massen in Rotationsmassen lässt sich die Herausforderung der kleinen Massen bei periodisch anregenden Power-Tools in einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung lösen. Ebenso ist durch die in der Methode vorgeschlagene Transformation eine reine Rotation im Hand-Arm Modell möglich, die einerseits eine einfache Lagerung ermöglicht und andererseits die große Herausforderung der grifffesten Orientierung bisheriger translatorischer Modelle des Stands der Forschung löst. Mittels des in Abschnitt 7.3.2 formulierten iterativen Prozesses aus Konstruktion, Komponentenauswahl, Abstraktion und Simulation lässt sich ein so entwickeltes theoretisches Hand-Arm Modell in ein physisches Hand-Arm Modell transformieren.

Zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften ist eine Verstellung der Steifigkeiten, der Dämpfungen und der Trägheiten im physischen Modell notwendig. Die im Abschnitt 7.4 vorgestellten Lösungen zur kontinuierlichen Verstellung dieser Parameter in einem physischen Hand-Arm Modell sind bislang einzigartig im Stand der Forschung. Mit Hilfe dieser Lösungen kann ein Hand-Arm Modell für periodisch anregende Power-Tools in einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung ausgelegt und konstruiert werden. Auf Basis der theoretischen Kennwerte dieser Komponenten ist es möglich, mit dem Modell die Heterogenität der Phase der Impedanz im Anregungsfrequenzbereich um 23 Hz in guter Vorhersagequalität abzubilden. Das Modell kann den Mittelwert des Betrages der Impedanz nach ISO 10068:2012-12 und einen weiten Bereich der angegebenen Heterogenität des Betrages sehr gut abbilden. Die obere und untere Grenze des Hand-Arm System Impedanz-Betrages wird jedoch nicht erreicht.

Bezugnehmend auf die zweite und dritte Unterfrage der dritten Forschungsfrage aus Abschnitt 4.2 lässt sich folgendes feststellen:

Forschungsfrage 3: Physische Modellierung der passiven Anwendereigenschaften

Wie kann ein theoretisches Black-Box Modell physisch umgesetzt werden?

Durch die Transformation eines translatorischen Zweimassen-Schwinger Modells zur Vorhersage der passiven Anwendereigenschaften in ein zur Unterarm-Achse rotatorisch wirkendes Hand-Arm Modell können wesentliche Herausforderungen bei der Entwicklung physischer Hand-Arm Modelle für Impulsschrauber gelöst werden. Durch den Einsatz der in Abschnitt 7.4 beschriebenen Lösungen zur Veränderung der Steifigkeiten, der Dämpfungen und der Trägheiten im physischen Modell, lässt sich auch die angegebene Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften nach ISO 10068:2012-12 bei einer Anregungsfrequenz von 23 Hz in Grenzen abbilden.

Innerhalb des Abschnittes 7.4 wurden Lösungen zur Veränderung der Steifigkeiten, der Dämpfungen und der Trägheiten im physischen Modell beschrieben und deren theoretische Variabilität angegeben. Im folgenden Abschnitt werden die erzielten Modellimpedanzen überprüft und die physischen Subsysteme Dämpfer und Steifigkeiten vermessen.

7.6 Vermessung des physischen Hand-Arm Modells zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften (Methodenevaluierungsphase)

Das entwickelte physische Hand-Arm Modell soll es erstmals ermöglichen, die passiven Anwendereigenschaften und deren Heterogenität zur entwicklungsbegleitenden Validierung veränderlich aber dennoch reproduzierbar in Prüfstandversuchen abzubilden. Kernpunkt dieses Modelles ist somit die Möglichkeit, durch Verstellung von Steifigkeit, Dämpfung und Trägheit die Impedanz des Modells im anwenderüblichen Rahmen verstellen zu können.

Das Massenträgheitsmoment eines Körpers lässt sich mittels der genauen Modellierung im CAD-System hinreichend genau bestimmen. Eine Überprüfung der Plausibilität der Werte fällt durch den Vergleich der Gewichte (sofern homogene Körper vorliegen) mit dem realen Teil einfach. Das Massenträgheitsmoment ist hierbei unabhängig von der Anregungsfrequenz des Hand-Arm Modells. Die Bestimmung der Steifigkeit einer Feder ist analytisch ebenfalls möglich. In der Realität ist sie jedoch der

genauen Federgeometrie und Ungenauigkeiten an den Anschlussstellen unterworfen. Eine Frequenzabhängigkeit der Federsteifigkeit ist hingegen nicht zu erwarten. Die Dämpfungseigenschaften sind rechnerisch nur durch aufwendige Simulationen abzuschätzen. Sie sind in der Praxis nicht unabhängig von der Anregungsfrequenz.

Um ein bestmögliches Systemverständnis aufzubauen, werden innerhalb dieses Abschnittes nicht nur die erzielten Modellimpedanzen überprüft, sondern ebenfalls die Subsysteme Dämpfer und Steifigkeit identifiziert. Hierdurch wird die in Abschnitt 7.3 entwickelte Methode zur Abbildung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften in einem physischen Modell auf Basis eines theoretischen Modells evaluiert.

7.6.1 Bestimmung der Federkonstante

7.6.1.1 Messmethode zur Bestimmung der Steifigkeit

Die Steifigkeit der Drehfedern lässt sich über das notwendige statische Moment T in Relation zur entstehenden statischen Auslenkung θ messen. Das Hand-Arm Modell wird hierfür ausgangsseitig, wie in Bild 7-14 dargestellt, über eine Messnabe zur Erfassung des Drehmomentes an einen Synchronmotor angeschlossen. Bei verschiedenen aktiven Federlängen (Einstellungen der Feder nach Abschnitt 7.4.2) wird eine Messung der Auslenkung bei verschiedenen statischen Drehmomenten durchgeführt. Das Maximalmoment wird bei jeder Einstellung so gewählt, dass die Auslenkung der Dämpfer knapp unterhalb der maximalen 30° bleibt.

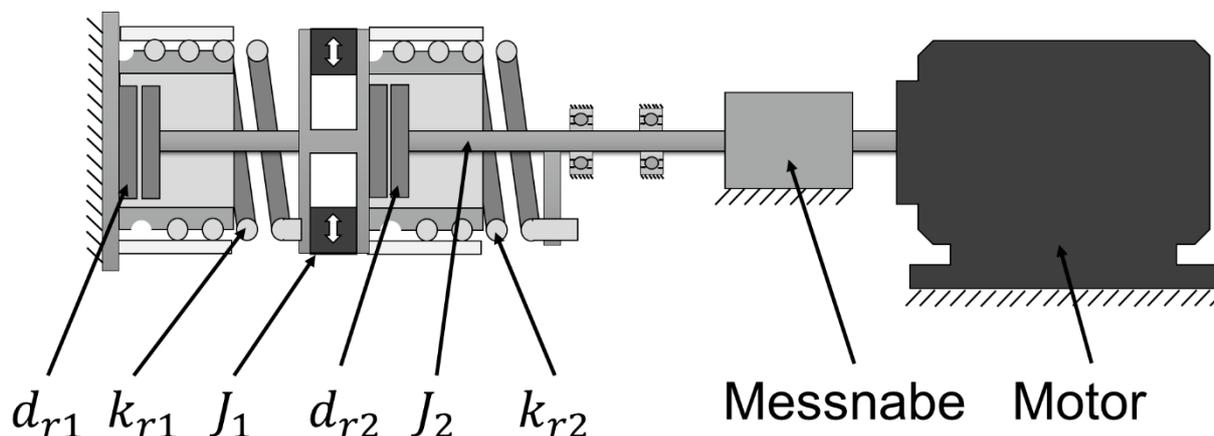


Bild 7-14: Messanordnung zur Bestimmung der Steifigkeit und der Dämpfung des Hand-Arm Modells

Aufgrund der seriellen Schaltung der beiden Federelemente innerhalb des Modells ist gesamtsystemisch zunächst nur die Gesamtfedersteifigkeit direkt zu messen. Durch eine Fixierung der Masse J_1 (siehe Bild 7-15) wird diese serielle Schaltung aufgehoben, so dass zunächst allein die Federsteifigkeit der Feder k_{r2} untersucht werden kann.

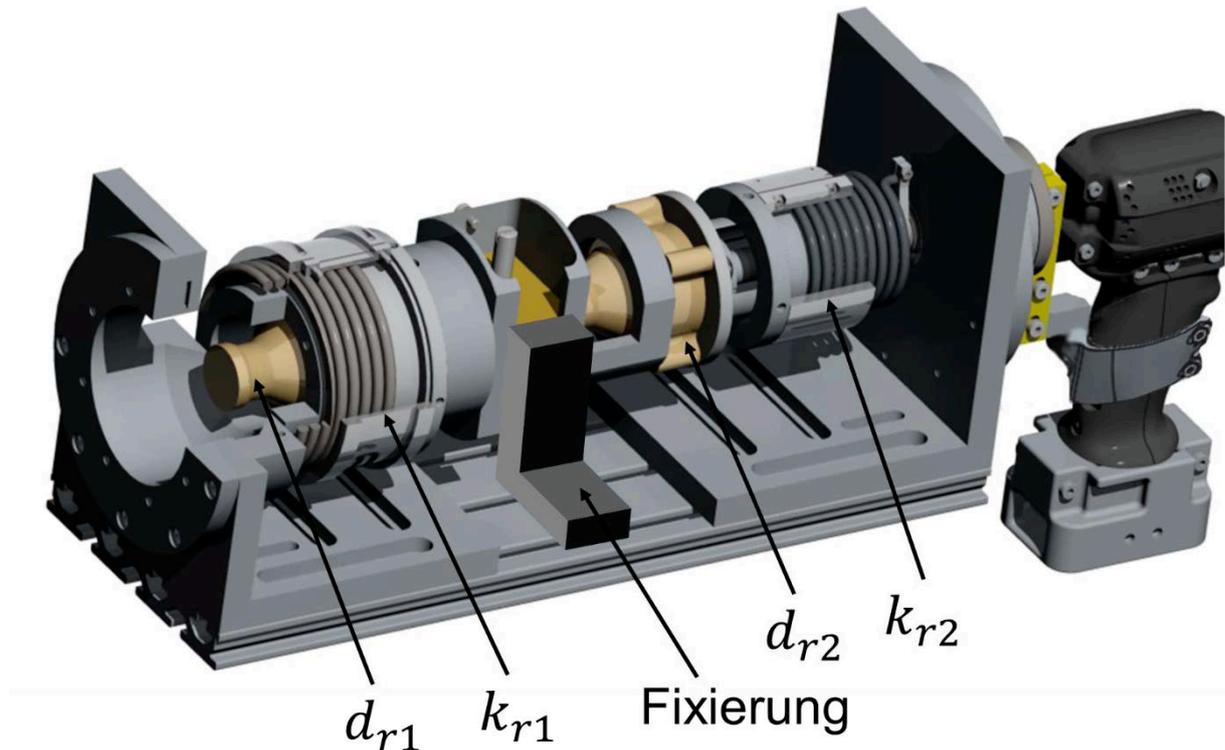


Bild 7-15: Lage der Federn k_{r1} und k_{r2} im Hand-Arm Modell und Fixierung der Masse J_1

Die Federsteifigkeit k_{r2} errechnet sich zu:

$$k_{r2} = f(\text{aktiver Federanteil}) = \frac{T}{\theta} \quad \text{Gl. 7-10}$$

Nach der Bestimmung der Federsteifigkeit k_{r2} kann die Fixierung der Masse J_1 gelöst werden und die Bestimmung der Federsteifigkeit k_{r1} wird möglich über:

$$k_{r1} = f(\text{aktiver Federanteil}) = \frac{T}{\theta - \frac{T}{k_{r2}}} \quad \text{Gl. 7-11}$$

7.6.1.2 Messkette zur Bestimmung der Steifigkeit des Hand-Arm Modells

Sowohl die Sollwertvorgabe für Moment und Anregungsfrequenz als auch die Datenerfassung ist in MATLAB® implementiert. Die Daten werden durch ein Multi-I/O-Modul (Pro-II-MIO-4-ET1) im Mess- und Regelsystem ADwin-Pro II mit einer Abtastrate von 1 kHz erfasst. Die gesamte Messkette ist in Bild 7-16 dargestellt.

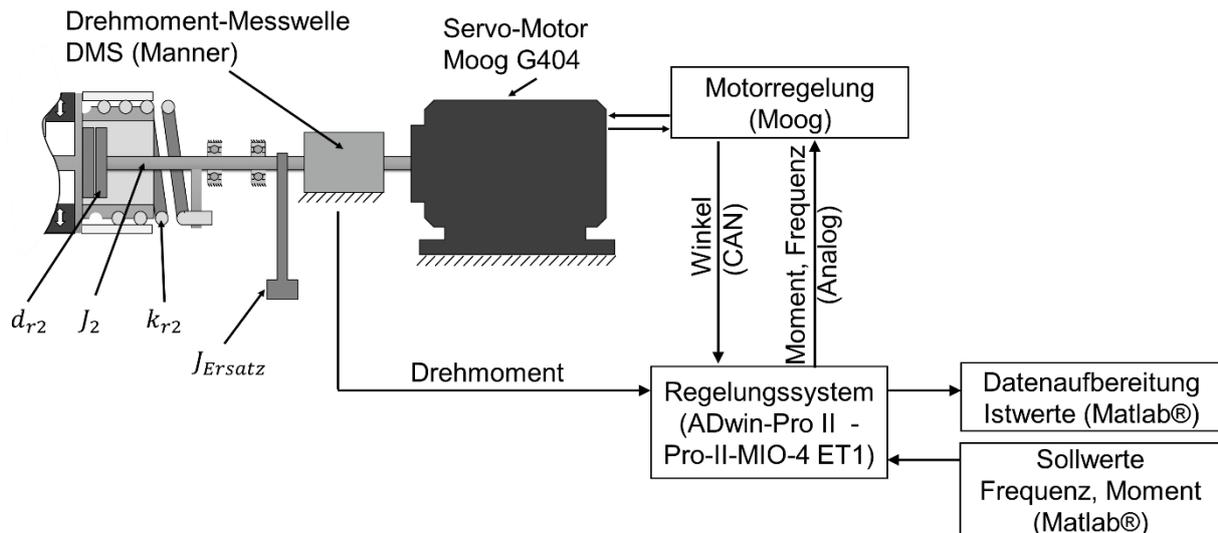


Bild 7-16: Messkette zur Bestimmung der Steifigkeit, der Dämpfung und der Impedanz des Hand-Arm Modells

Das Drehmoment wird über eine DMS-basierte Messwelle (Messwellen Kit 10-010) von Manner gemessen. Die Auslenkung wird vom Motor-Encoder über die Motorregelung des Servo-Motors G404 von Moog über CAN-Bus ausgegeben.

7.6.1.3 Versuchsdesign

Zur Messung der Federsteifigkeit der Feder k_{r2} wird die statische Auslenkung des Hand-Arm Modells bei den in Tabelle 7-6 beschriebenen Momenten für verschiedene Federeinstellungen gemessen. Die Anzahl der offenen Windungen, also die Länge des aktiven Teils der Feder (vgl. Abschnitt 7.4.2) wird variiert. Die Rotationsmasse J_1 ist hierbei, wie in Abschnitt 7.6.1.1 beschrieben, gegen Verdrehen gesichert. Für die sehr geringen Steifigkeiten (6 bzw. 5 Windungen geöffnet) ist die maximale Auslenkung bereits bei ca. 3 Nm erreicht – Hier werden nur 6 anstatt 8 Messstellen genutzt. Alle Versuche werden dreifach wiederholt um eine eventuell vorhandene Streuung zu erkennen. Der Punkt „1 Windung offen“ liegt weit außerhalb des Zielbereiches der Federsteifigkeit und wird deshalb verworfen.

Tabelle 7-6: Übersicht über die durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Federsteifigkeit der Feder k_{r2} im Hand-Arm Modell

Moment Einstellung k_{r2}	T in Nm
6 Windungen offen	6 Messwerte im Bereich -3 ... +3
5 Windungen offen	6 Messwerte im Bereich -3 ... +3
4 Windungen offen	8 Messwerte im Bereich -4 ... +4
3 Windungen offen	8 Messwerte im Bereich -4 ... +4
2 Windungen offen	8 Messwerte im Bereich -4 ... +4

Zur Bestimmung der Federsteifigkeit der Feder k_{r1} wird die Fixierung der Masse J_1 aufgehoben. Die Federsteifigkeit der vorgeschalteten Feder k_{r2} wird maximal gewählt (2 Windungen offen). Die statische Auslenkung des Hand-Arm Modells wird bei den in Tabelle 7-7 dargestellten Momenten für verschiedene Federeinstellungen gemessen.

Tabelle 7-7: Übersicht über die durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Federsteifigkeit der Feder k_{r1} im Hand-Arm Modell

Moment Einstellung k_{r1}	T in Nm
6 Windungen offen	8 Messwerte im Bereich -2,5 ... +2,5
5 Windungen offen	8 Messwerte im Bereich -2,5 ... +2,5
4 Windungen offen	8 Messwerte im Bereich -2,5 ... +2,5
3 Windungen offen	8 Messwerte im Bereich -2,5 ... +2,5
2 Windungen offen	8 Messwerte im Bereich -2,5 ... +2,5
1 Windung offen	8 Messwerte im Bereich -2,5 ... +2,5

Die Messungen werden ebenfalls zur Erkennung eventuell vorhandener Streuung dreifach wiederholt.

7.6.1.4 Ergebnisse und Diskussion

Bild 7-17 zeigt den Zusammenhang zwischen dem gemessenen Moment T und der gemessenen Auslenkung θ für die 5 untersuchten Einstellungen der Feder mit der Federsteifigkeit k_{r2} . Die Messpunkte sind jeweils durch die Markierungen dargestellt.

Das durch den Motor aufgebraachte Moment T ist hierbei in Nm auf der Ordinate und die gemessene Auslenkung θ auf der Abszisse in rad aufgetragen. Die Gleichung der sich ergebenden linearen Annäherung (gepunktete Linien) an die Messdaten ist ebenfalls angegeben. Die Steigung dieser Geraden entspricht der gemessenen Federsteifigkeit k_{r2} .

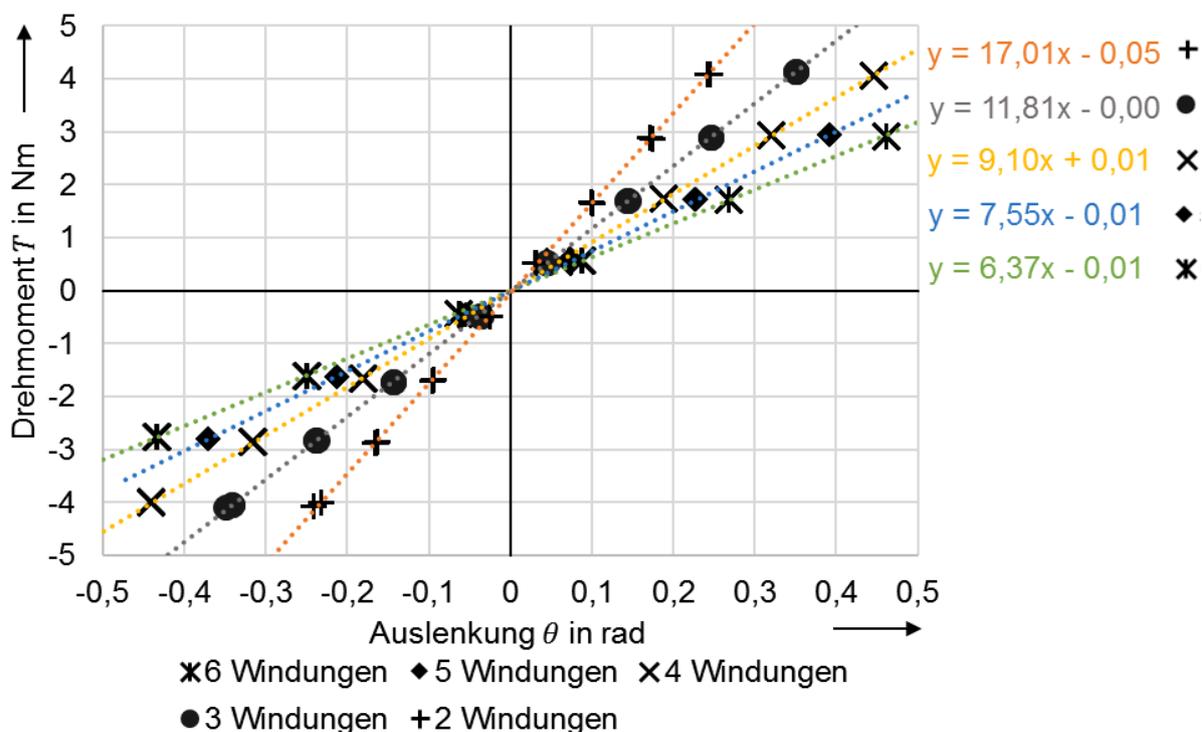


Bild 7-17: Zusammenhang zwischen dem gemessenen Moment und der gemessenen Auslenkung für die 5 untersuchten Einstellungen der Feder mit der Federsteifigkeit k_{r2}

Die Messpunkte der 3 Versuchswiederholungen bei jeweils gleicher Einstellung sind quasi deckungsgleich. Die Datenpunkte liegen mit kaum erkennbaren Abweichungen auf den linearen Näherungsgeraden. Die Annahme eines linearen, zur Auslenkung proportionalen Federsteifigkeits-Faktors k_{r2} ist somit auch im physischen Modell zutreffend. Die Federsteifigkeit lässt sich wie in Tabelle 7-8 angegeben verstellen.

Tabelle 7-8: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Einstellbereichen der Feder k_{r2} im Hand-Arm Modell

	k_{r2} in Nm/rad	
	Min	Max
Soll-Einstellbereich	5	15
Ist-Einstellbereich	6,4	17,0

Die theoretisch geforderten Einstellbereiche aus Abschnitt 7.4.5 können somit in weitem Rahmen eingehalten werden. Lediglich die Realisierung der niedrigen Steifigkeit von $k_{r2} = 5 \text{ Nm/rad}$ ist nicht möglich. Hier ist in zukünftigen Hand-Arm Modellen ein größerer Einstellweg der Feder vorzusehen.

In Bild 7-18 ist in gleicher Darstellungsweise der Zusammenhang zwischen dem gemessenen Moment und der gemessenen Auslenkung für die 6 untersuchten Einstellungen der Feder mit der Federsteifigkeit k_{r1} aufgetragen.

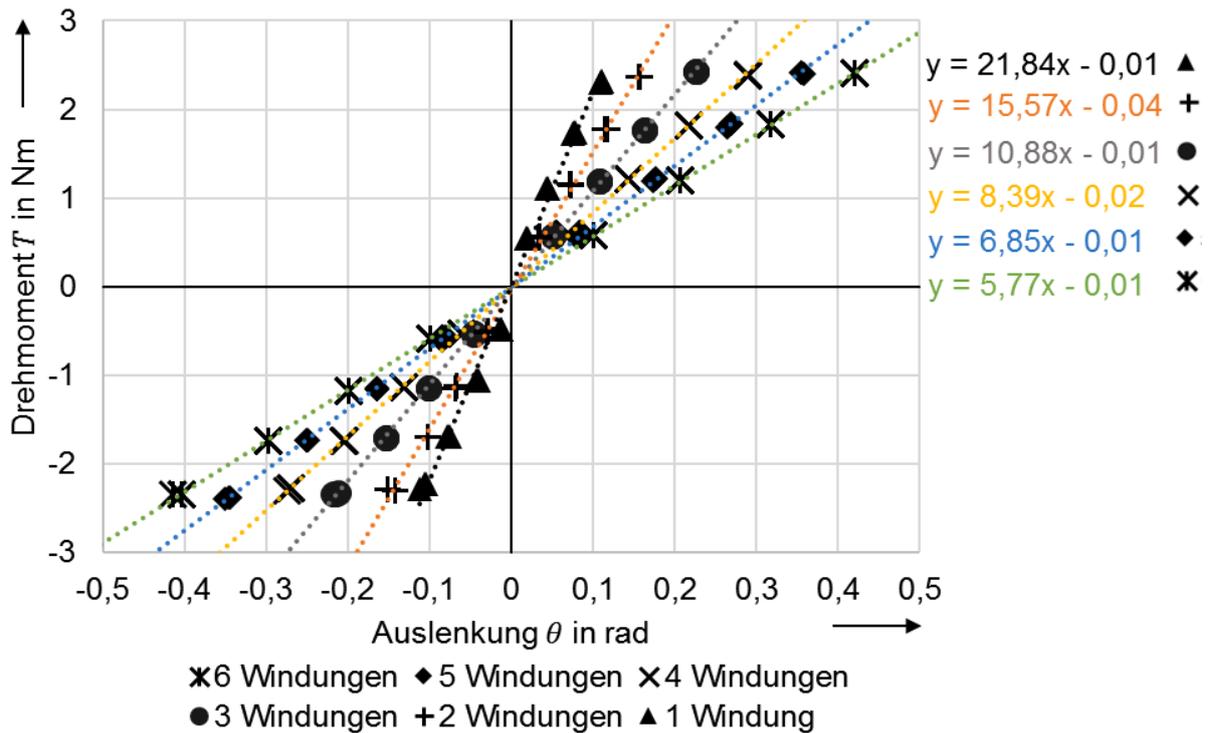


Bild 7-18: Zusammenhang zwischen dem gemessenen Moment und der gemessenen Auslenkung für die 6 untersuchten Einstellungen der Feder mit der Federsteifigkeit k_{r1}

Wie im Falle der vorderen Feder k_{r2} liegen die Messpunkte der 3 Versuchswiederholungen bei jeweils gleicher Einstellung quasi deckungsgleich übereinander. Des Weiteren liegen für die Datenpunkte „6-2 Windungen offen“ kaum erkennbare Abweichungen von den linearen Näherungsgeraden vor. Bei den Datenpunkten „1 Windung offen“ kommt es zu kleinen Abweichungen zwischen theoretischem und physischem Modell. Hier dominieren die geometrischen Abweichungen der Feder von der idealen Feder an den Endstellen der Feder. Die Annahme eines linearen, zur Auslenkung proportionalen Federsteifigkeits-Faktors k_{r1} ist jedoch im Gesamten betrachtet wegen der nur geringen Abweichung auch in diesem physischen Modell zulässig. Die Feder lässt sich im in Tabelle 7-9 angegebenen Bereich stufenlos verstellen.

Tabelle 7-9: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Einstellbereichen der Feder k_{r1} im Hand-Arm Modell

	k_{r1} in Nm/rad	
	Min	Max
Soll-Einstellbereich	5	10
Ist-Einstellbereich	5,8	21,8

Die theoretisch geforderten Einstellbereiche aus Abschnitt 7.4.5 können somit ebenfalls in weitem Rahmen eingehalten werden. Zur Realisierung der niedrigen Steifigkeit von $k_{r1} = 5 Nm/rad$ ist, wie auch bei k_{r2} , in zukünftigen Hand-Arm Modellen ein größerer Einstellweg der Feder vorzusehen.

7.6.2 Bestimmung der Dämpfungskonstante

7.6.2.1 Messmethode zur Bestimmung der Dämpfung

Die Dämpfung kann im physischen Modell im Gegensatz zur Steifigkeit im Allgemeinen nicht als frequenzunabhängige Größe betrachtet werden. Die Dämpfungskonstanten d_{r1} und d_{r2} müssen demnach über der Frequenz bestimmt werden, um Abweichungen zur theoretisch frequenzunabhängigen, nur zur Geschwindigkeit proportionalen, Dämpfungskonstante festzustellen. Da im Hand-Arm Modell, äquivalent zu den Steifigkeiten, eine Reihenschaltung der Dämpfer vorliegt, ist ohne Modifikation nur die Gesamtdämpfungskonstante direkt messbar. Durch die Fixierung der Masse J_1 (siehe Bild 7-15) wird auch hier die serielle Schaltung aufgehoben. Die beiden verwendeten Dämpfer sind in ihren Abmaßen äußerlich baugleich. Hierdurch ist es möglich, das Hand-Arm Modell umzubauen und die Bestimmung der beiden Dämpfungskonstanten d_{r1} und d_{r2} jeweils in vorderer Einbaulage durchzuführen. Der Ansatz zur Bestimmung der beiden Dämpfungskonstanten ist somit gleich. Innerhalb dieser Arbeit werden die Dämpfungskonstanten über einen modellbasierten Least-Square Ansatz bestimmt. Das Modell-Ersatzsystem, welches das Hand-Arm Modell mit fixierter Masse J_1 repräsentiert, ist schematisch in Bild 7-19 dargestellt.

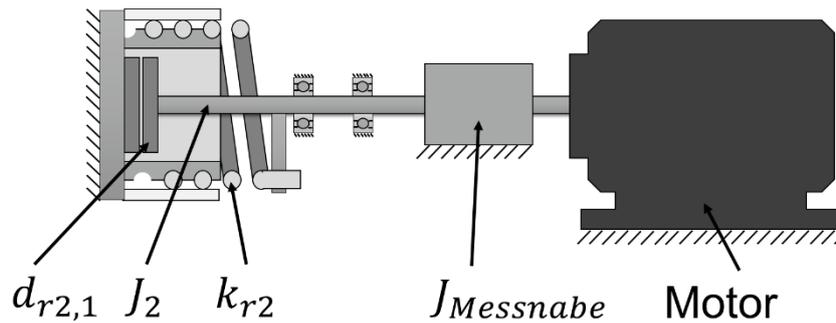


Bild 7-19: Schematisches Modell-Ersatzsystem zur Bestimmung der Dämpfungskonstanten d_{r1} und d_{r2} durch Fixierung der Masse J_1 im Hand-Arm Modell

Für das bis zur Drehmoment-Messnabe freigeschnittene Ersatzsystem gilt zu jedem Zeitpunkt der Messung mit dem Drehwinkel θ :

$$d_{r2,1} \cdot \dot{\theta} = T - (J_{\text{Messnabe}} + J_2) \cdot \ddot{\theta} - k_{r2} \cdot \theta \quad \text{Gl. 7-12}$$

oder in Matrixschreibweise:

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_{t=1} \\ \vdots \\ \dot{\theta}_{t=n} \end{pmatrix} \cdot d_{r2,1} = \begin{pmatrix} T_{t=1} \\ \vdots \\ T_{t=n} \end{pmatrix} - (J_{\text{Messnabe}} + J_2) \cdot \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_{t=1} \\ \vdots \\ \ddot{\theta}_{t=n} \end{pmatrix} - k_{r2} \cdot \begin{pmatrix} \theta_{t=1} \\ \vdots \\ \theta_{t=n} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 7-13}$$

Man erhält somit ein Gleichungssystem der Form:

$$\mathbf{A} \cdot d_{r2,1} = \mathbf{b} \quad \text{Gl. 7-14}$$

Und mit dem Least-Square Ansatz die Pseudolösung für die Dämpfungskonstante $d_{r2,1}$:

$$d_{r2,1}^* = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad \text{Gl. 7-15}$$

Bei den sechs vorhandenen Skalenstrichen des Dämpfers (min,1,2,4,8,16) wird zur Bestimmung der Dämpfungskonstante jeweils eine Messung bei sechs Frequenzen zwischen 1 und 36 Hz durchgeführt. Mit steigender Frequenz wird hierbei auch die Amplitude der aufgetragenen Sinusschwingung vergrößert, um eine möglichst große Auslenkung zu erreichen.

Die Messkette ist unverändert zu Abschnitt 7.6.1.2.

7.6.2.2 Versuchsdesign

Zur Bestimmung der Dämpfungskonstanten d_{r1} und d_{r2} wird die Rotationsmasse J_1 , wie in Abschnitt 7.6.1.1 beschrieben, gegen Verdrehen gesichert. Die vordere

Dämpfereinbaulage wird durch Umbau des Hand-Arm Modells zur Untersuchung beider Dämpfer genutzt. Um eine möglichst hohe Auslenkung zu realisieren, wird eine möglichst weiche Steifigkeit der vorderen Feder gewählt (6 Windungen offen). Die Bestimmung der Dämpfungskonstante erfolgt über der ansteigenden Frequenz. Das System wird hierfür jeweils 10 s lang mit einer konstanten Sinusschwingung angeregt, während Auslenkung und Moment zeitgleich erfasst werden. Die angelegte Frequenz steigt hierbei pro Messpunkt in einer Zweier-Potenz an. Um die Massebeschleunigung kompensieren zu können und jeweils möglichst große Auslenkungen zu erzielen, steigt das Moment ebenfalls mit der Frequenz zusammen linear an. Tabelle 7-10 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Versuche. Als untersuchte Dämpfereinstellungen werden die sechs vorhandenen Skalenstriche des Dämpfers (min, 1, 2, 4, 8, 16) gewählt.

Tabelle 7-10: Übersicht über die durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Dämpfungskonstanten d_{r1} und d_{r2} im Hand-Arm Modell

Einstellungen	Versuche
6 Dämpfereinstellungen: min, 1, 2, 4, 8, 16	je 6 Messwerte: 1 Hz: 3 Nm 4 Hz: 4 Nm 9 Hz: 5 Nm 16 Hz: 6 Nm 25 Hz: 7 Nm 36 Hz: 8 Nm

Die Messungen werden zur Erkennung eventuell vorhandener Streuungen dreifach wiederholt. Die Wiederholung erfolgt hierbei zeitlich direkt aufeinander um einen Einfluss der Erwärmung des Dämpferfluides erkennen zu können.

7.6.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Der Zusammenhang zwischen Anregungsfrequenz und der (anhand der in Abschnitt 7.6.2.1 beschriebenen Methode) aus den Messdaten errechneten Dämpfungskonstante d_{r1} für die 6 untersuchten Einstellungen des Dämpfers ist in Bild 7-20 dargestellt. Die ermittelte Dämpfungskonstante ist hierbei in Nms/rad auf der Ordinate und die Frequenz auf der Abszisse in Hz aufgetragen. Die Messpunkte sind als Datenpunkte dargestellt. Die eingetragenen gestrichelten Linien entsprechen einer einfachen Spline-Interpolation der Daten.

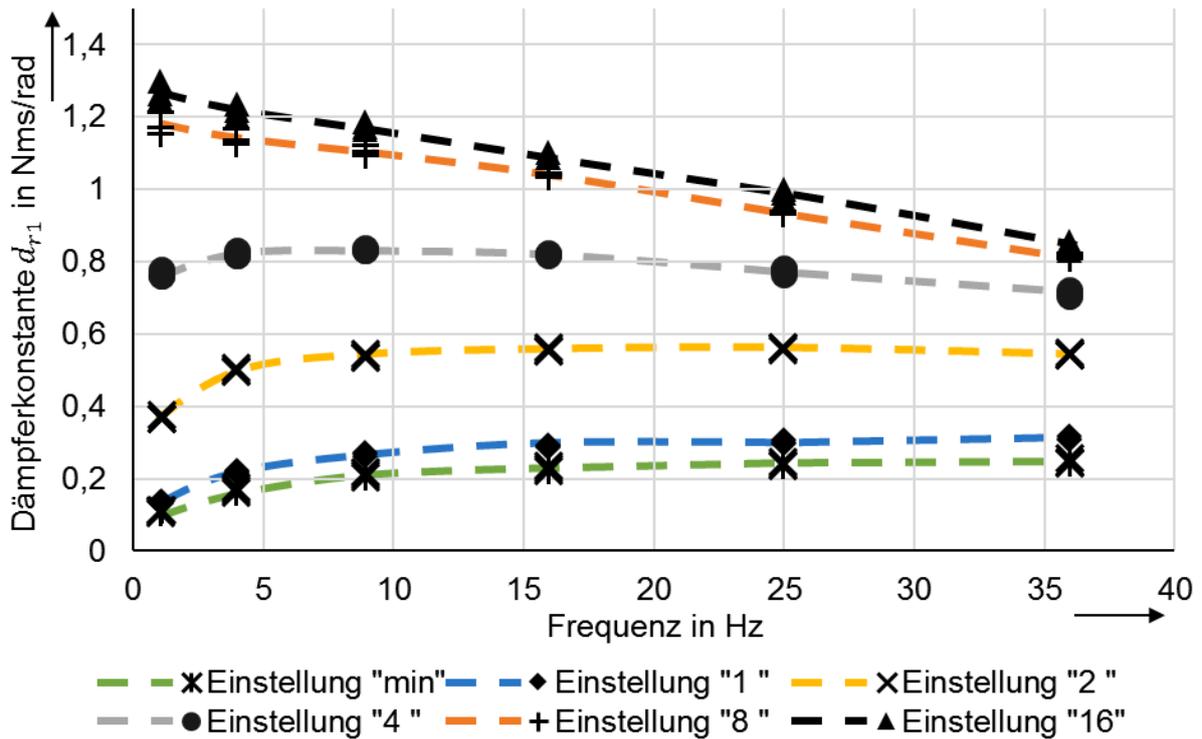


Bild 7-20: Zusammenhang zwischen gemessener Dämpfungskonstante d_{r1} und der Anregungsfrequenz bei 6 Dämpfereinstellungen

Die 3 Versuchswiederholungen je Dämpfereinstellung unterscheiden sich kaum. Die Datenpunkte bei jeweils gleicher Einstellung liegen sehr nahe zusammen. Deutlich lässt sich eine Abhängigkeit der gemessenen Dämpfungskonstante d_{r1} von der Frequenz beobachten. Bei niedrigen Dämpfereinstellungen steigt hierbei die Dämpfungskonstante mit der Frequenz bis zum Faktor 2 an, während bei hohen Dämpfereinstellungen ein Abfall der gemessenen Dämpfungskonstante um den Faktor 0,6 beobachtbar ist. Die Dämpfungskonstante zeigt somit keine proportionalen Abhängigkeiten von der Frequenz. Der Einstellbereich des Dämpfers bei der Frequenz von 23 Hz (das heißt der Hauptfrequenz des hier im Fokus stehenden Impulsschraubers) lässt sich Tabelle 7-11 entnehmen.

Tabelle 7-11: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Einstellbereichen des Dämpfers d_{r1} im Hand-Arm Modell bei 23 Hz

	d_{r1} in <i>Nms/rad</i>	
	Min	Max
Soll-Einstellbereich	0,09	1,13
Ist-Einstellbereich	0,24	1,01

Die theoretischen Soll-Einstellbereiche aus Abschnitt 7.4.5 können somit weder nach unten noch nach oben in vollem Rahmen abgebildet werden. Eine Verstellung der Dämpferkonstante um den Faktor 4 ist jedoch erreichbar. Es ist zu prüfen, inwiefern dieser Umstand eine Abbildung verschiedener Impedanzen erschwert.

In Bild 7-21 ist in gleicher Darstellungsweise der Zusammenhang zwischen Anregungsfrequenz und der aus den Messdaten errechneten Dämpfungskonstante d_{r2} für die 6 untersuchten Einstellungen des Dämpfers dargestellt.

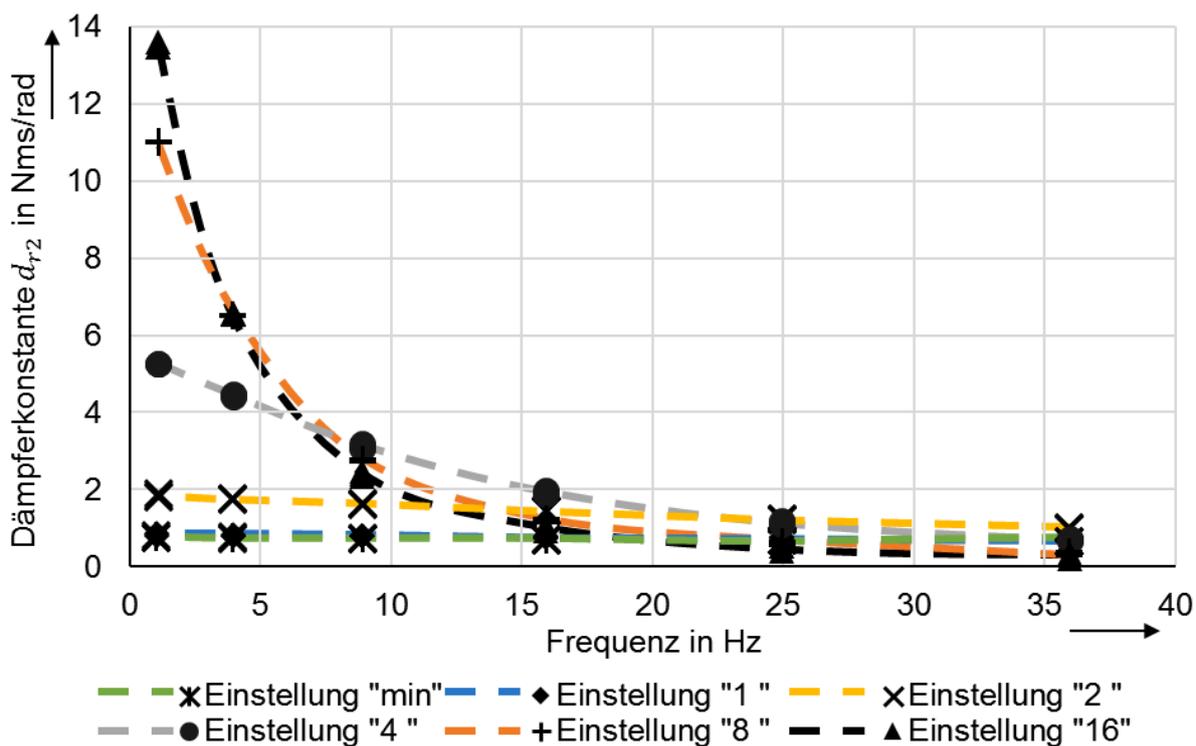


Bild 7-21: Zusammenhang zwischen gemessener Dämpfungskonstante d_{r2} und der Anregungsfrequenz bei 6 Dämpfereinstellungen

Die Überdeckung der Messpunkte der 3 Versuchswiederholungen bei jeweils gleicher Einstellung ist, wie im Fall des Dämpfers d_{r1} , sehr hoch. Auch hier führen Erwärmungen innerhalb des Dämpfers somit während der Dauer der Versuche zu keiner grundlegenden Veränderung der Dämpfungskonstante. Es ergibt sich eine extreme Abhängigkeit der gemessenen Dämpfungskonstante von der Frequenz. Während die Abhängigkeit für die niedrigen Dämpfereinstellungen noch vergleichbar zum Dämpfer d_{r1} ist, ergibt sich eine Abschwächung der gemessenen Dämpfungskonstante sogar unter die gemessenen Dämpfungskonstanten mit niedrigerer Dämpfereinstellung. Der Dämpfer lässt sich auf Basis der Messungen bei der Frequenz von 23 Hz wie in Tabelle 7-12 beschrieben verstellen.

Tabelle 7-12: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Einstellbereichen des Dämpfers d_{r2} im Hand-Arm Modell bei 23 Hz

	d_{r2} in Nms/rad	
	Min	Max
Soll-Einstellbereich	1,13	11
Ist-Einstellbereich	0,69	1,28

Die theoretischen Einstellbereiche aus Abschnitt 7.4.5 können somit zwar im vollen Rahmen nach unten jedoch bei weitem nicht im theoretischen Rahmen nach oben abgebildet werden. In der folgenden Untersuchung werden die Auswirkungen dieses fehlenden Abbildungsrahmens abgeschätzt.

7.6.3 Messung der erzielten Impedanz des physischen Hand-Arm Modells

Nachdem die Subsysteme Feder und Dämpfer identifiziert wurden, wird abschließend die Variabilität der Impedanz des Hand-Arm Modells überprüft und der Hand-Arm System Impedanz aus der Literatur gegenübergestellt. Die durchgeführten Versuche haben jedoch starke Abweichungen bei der Einstellbarkeit der Dämpfung im Vergleich zu den vom Hersteller angegebenen Einstellbereichen (vgl. Abschnitt 7.4.1) ergeben. Hierdurch sind erhebliche Abweichungen der realisierbaren Impedanzen in Betrag und Phase von den in Abschnitt 7.4.5 vorhergesagten Werten zu erwarten. Mit den vorhandenen erreichten Werten wird innerhalb dieses Abschnittes eine Optimierung der Modellimpedanz auf die Impedanz über der Frequenz nach ISO 10068:2012-12 in Betrag und Phase in x_h -Richtung und deren Variation in diesem Bereich durchgeführt. Gegenüber dem bisher betrachteten Modell hat sich zusätzlich eine Änderung in der Masse J_2 ergeben. In durchgeführten Versuchen mit dem Impulsschrauber konnte eine unzureichende Festigkeit der Verbindung zwischen Hand-Arm Modell und Impulsschrauber festgestellt werden. Für die Optimierung wird deshalb die leicht erhöhte Masse $J_2=0,00043$ (bisher $J_2=0,00034$) verwendet, die für eine solidere Anbindungsstruktur notwendig ist. Als Gewichtungsfunktion für die Optimierung wird Gl. 7-16 verwendet, um eine möglichst gute Näherung im Bereich der Hauptfrequenz des hier betrachteten Impulsschraubers trotz unzureichender Einstellbereiche von Feder und Dämpfer erreichen zu können.

$$G(\omega) = \begin{cases} 0 & \omega < 10 \text{ Hz} \cdot 2\pi \\ 1 & 22 \text{ Hz} \cdot 2\pi \leq \omega \leq 24 \text{ Hz} \cdot 2\pi \\ 0 & \omega > 50 \text{ Hz} \cdot 2\pi \end{cases} \quad \text{Gl. 7-16}$$

7.6.3.1 Messmethode zur Bestimmung der Impedanz

Zur Bestimmung der Modellimpedanz muss ein Zusammenhang zwischen den messbaren Größen Moment \underline{T} und Winkel $\underline{\theta}$ sowie der am Handmittelpunkt wirkenden Kraft \underline{F} und der Auslenkung an dieser Stelle x gefunden werden. Die Herleitung geschieht hierbei aufbauend auf Abschnitt 6.1.1 und Abschnitt 7.3.1. Es gilt:

$$\underline{Z}(\omega) = \frac{\underline{F}(\omega)}{\underline{\dot{x}}(\omega)}; \quad \underline{T}(\omega) = \underline{F}(\omega) \cdot r_{Hand} \quad \text{und} \quad \text{Gl. 7-17}$$

$$\underline{\dot{x}}(\omega) = \underline{\dot{\theta}}(\omega) \cdot r_{Hand}$$

Somit folgt direkt:

$$\underline{Z}(\omega) = \frac{\underline{T}(\omega)}{\underline{\dot{\theta}}(\omega) \cdot r_{Hand}^2} \quad \text{Gl. 7-18}$$

Da bei dieser Messung keine Leerimpedanz des Aufbaus zu berücksichtigen ist (die sehr kurze Stahlwelle zwischen Messnabe und Hand-Arm Modell wird als unendlich steif und nicht dämpfend betrachtet), muss keine Leerimpedanzmessung durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 6.3.5). Es ergibt sich aus der Messung mit dem Nullphasenwinkel des Momentes φ_{0T} und dem Nullphasenwinkel der Winkelgeschwindigkeit $\varphi_{0\dot{\theta}}$:

$$\underline{Z}(\omega) = \frac{\hat{T} \cdot e^{j(\varphi_{0T} - \varphi_{0\dot{\theta}})}}{\hat{\dot{\theta}} \cdot r_{Hand}^2} \quad \text{Gl. 7-19}$$

Betrag und Phase der Impedanz lassen sich dann direkt über Gl. 2-4 und Gl. 2-5 errechnen.

Die Messung von Drehmoment und Auslenkung mittels Synchronmotor und Messnabe erfordert eine Modifikation am Hand-Arm Modell. Die Anbindungsstruktur an das Power-Tool (Bild 7-12 – Teil zwischen Ausgangswelle und Schraubengriff) kann hier aus Platzgründen nicht verwendet werden. Um dennoch korrekte Ergebnisse zu erlangen, wird die Trägheit bei der Messung durch die äquivalente Trägheit J_{Ersatz} (siehe Bild 7-22) ersetzt.

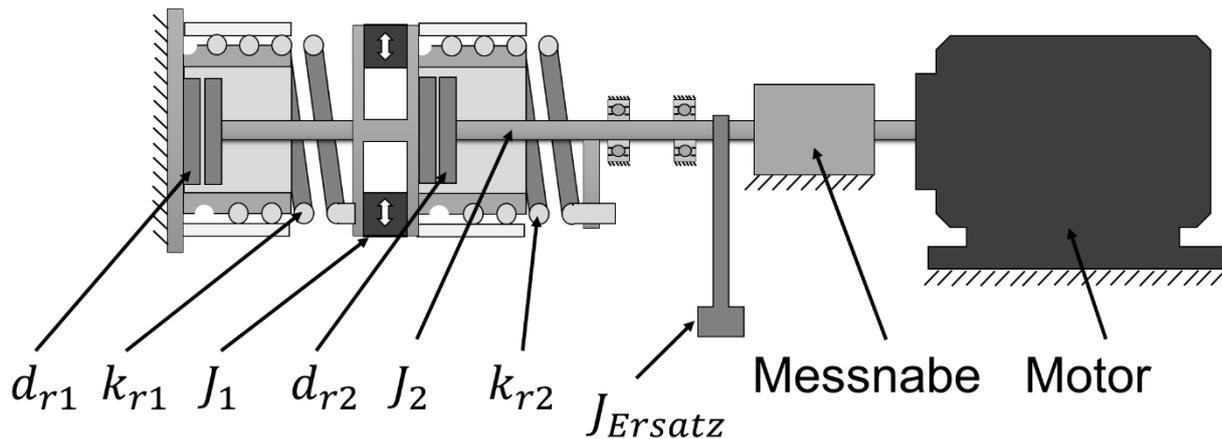


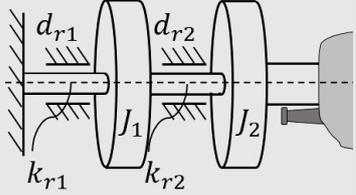
Bild 7-22: Messanordnung zur Bestimmung der Impedanz des Hand-Arm Modells

Die Messkette ist unverändert zu Abschnitt 7.6.1.2.

7.6.3.2 Versuchsdesign

Die Überprüfung der Einstellbarkeit der Impedanz erfolgt nach der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Methode. Das System wird hierfür jeweils 10 s lang mit einer Sinusschwingung angeregt, während Auslenkung und Moment zeitgleich erfasst werden. Die Messungen werden bei ansteigender Frequenz bis 35 Hz durchgeführt. Das Moment steigt hierbei an, um bei zunehmenden Trägheitskräften noch große Auslenkungen zu erreichen. Der verwendete Motor kann jedoch nur bis zu 10 Nm sicher betrieben werden. Eine Übersicht der nach Vorgaben in Abschnitt 7.6.3 optimierten Versuchseinstellungen gibt Tabelle 7-13.

Tabelle 7-13: Übersicht über die durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Impedanz des physischen Hand-Arm Modells

Einstellungen	Versuche
 <p>Einstellung 1 - Linie „grün“ in Bild 7-24</p> <p>$J_1 = 0,0035 \text{ kgm}^2; J_2 = 0,000429 \text{ kgm}^2;$ $k_{r1} = 5,77 \text{ Nm/rad}; k_{r2} = 6,37 \text{ Nm/rad}$ $d_{r1} = 0,24 \text{ Nms/rad}; d_{r2} = 1,28 \text{ Nms/rad}$</p>	<p>je 10 Messwerte:</p> <p>1 Hz 2,9 Nm 2 Hz 3,3 Nm 5 Hz 4,5 Nm 10 Hz 6,5 Nm 15 Hz 8,5 Nm 20 Hz 10 Nm 23 Hz 10 Nm 25 Hz 10 Nm 30 Hz 10 Nm 35 Hz 10 Nm</p> <p>6 Wiederholungen</p>
<p>Einstellung 2 - Linie „rot“ in Bild 7-24</p> <p>$J_1 = 0,0036 \text{ kgm}^2; J_2 = 0,000429 \text{ kgm}^2;$ $k_{r1} = 5,77 \text{ Nm/rad}; k_{r2} = 6,37 \text{ Nm/rad}$ $d_{r1} = 0,40 \text{ Nms/rad}; d_{r2} = 1,07 \text{ Nms/rad}$</p>	
<p>Einstellung 3 - Linie „blau“ in Bild 7-24</p> <p>$J_1 = 0,0032 \text{ kgm}^2; J_2 = 0,000429 \text{ kgm}^2;$ $k_{r1} = 21,84 \text{ Nm/rad}; k_{r2} = 6,37 \text{ Nm/rad}$ $d_{r1} = 0,29 \text{ Nms/rad}; d_{r2} = 0,69 \text{ Nms/rad}$</p>	

Die Messungen werden zur Erkennung eventuell vorhandener Streuung in zwei zeitlich getrennten Dreier-Serien wiederholt (Insgesamt pro Einstellung 6 Messungen). Die Wiederholung einer Dreier-Serie erfolgt hierbei zeitlich direkt aufeinander, um einen Einfluss der Erwärmung des Dämpferfluides erkennen zu können. Der Messaufbau zur Messung der Impedanz in Betrag und Phase über der Frequenz des physischen Hand-Arm Modells ist in Bild 7-23 abgebildet.

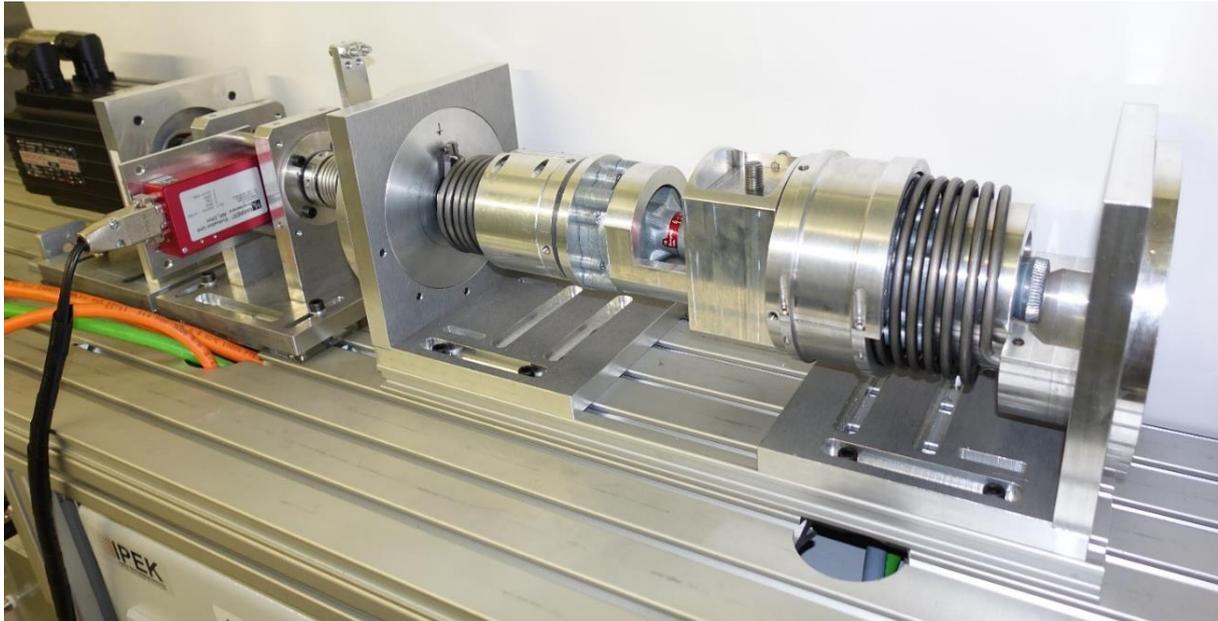


Bild 7-23: Messaufbau zur Messung der Impedanz in Betrag und Phase über der Frequenz des physischen Hand-Arm Modells

7.6.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Einstellungen des Hand-Arm Modells sind in Tabelle 7-13 beschrieben. Die gemessenen Werte der Impedanz des physischen Hand-Arm Modells sind in Bild 7-24 als gestrichelte farbige Linien in Betrag und Phase über der Frequenz für die untersuchten Einstellungen dargestellt. Die Messwerte im Bereich der Gerätehauptfrequenz des Impulsschraubers bei 23 Hz sind mit Datenpunkten hervorgehoben. Die Impedanz über der Frequenz nach ISO 10068:2012-12 in Betrag und Phase in x_h -Richtung (graue durchgezogene Linie) und deren Abweichungsgrenzen nach oben und unten (graue Strich-Punkt-Linie) ist ebenfalls angegeben.

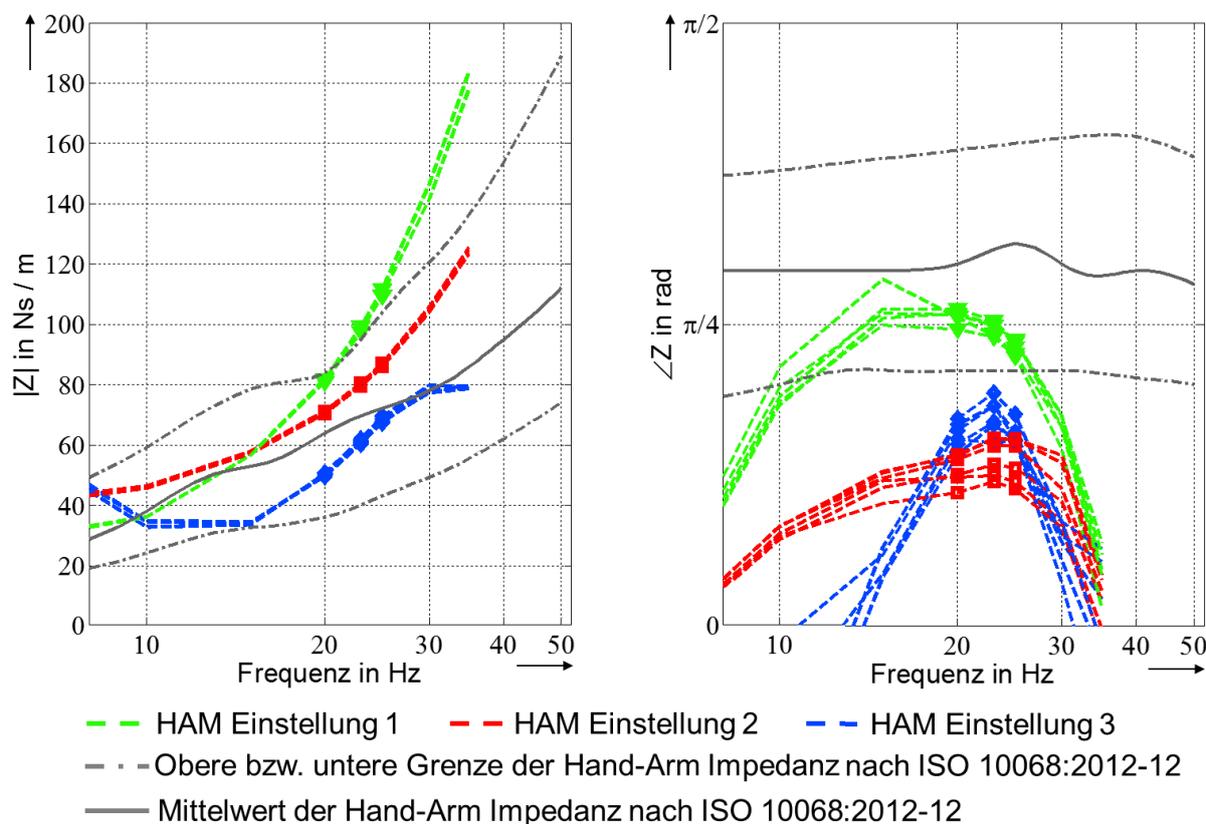


Bild 7-24: Vom physischen Hand-Arm Modell darstellbare Impedanzen in Betrag und Phase über der Frequenz

Die drei untersuchten Einstellungen bilden bei der Messung der Impedanz des Hand-Arm Modells einen großen Bereich der Anwenderheterogenität nach ISO 10068:2012-12 im Betrag der Impedanz im Bereich der Gerätehauptfrequenz von 23 Hz ab. Die gemessene Phase der Impedanz befindet sich in der unteren Hälfte der zu erwartenden Phase nach ISO 10068:2012-12 oder unterhalb der angegebenen unteren Grenze für die Phase. Die Werte entsprechen hierbei in etwa den gemessenen Werten der Phase der Impedanz am Anwender und deren Variation in Abschnitt 6.5. Es ist ersichtlich, dass die gemessene Impedanz insbesondere im Betrag eine sehr geringe Variation aufweist. Die Phase der Impedanz weist jedoch ebenfalls nicht mehr Variationen innerhalb einer Einstellung auf, als diese in Abschnitt 6.5 bei einer einzigen konstanten Versuchseinstellung mit Anwender aufgetreten sind.

Das physische Modell erlaubt in diesen drei Einstellungen beispielsweise in etwa die Untersuchung der Auswirkung eines Greifkraftwechsels von Proband 1 in Haltung 2 mit einer Andruckkraft von 30 N wie dieser in Abschnitt 6.5 festgestellt wurde durch den Wechsel von Einstellung 2 auf Einstellung 3. Oder, durch den Wechsel der Einstellung 1 auf Einstellung 3, die Untersuchung der Auswirkung vom Wechsel der Konfiguration „Proband 2, Haltung 2, Andruckkraft 30 N, Greifkraft 95 N“ auf die Konfiguration „Proband 1, Haltung 2, Andruckkraft 30 N, Greifkraft 20 N“ unter immer

wieder gleichen Bedingungen. Weitere Fälle für Kombinationen von Betrag und Phase der Impedanz können nur im Einzelfall überprüft werden. Eine generelle Aussage der Abbildbarkeit verschiedener Zustände ist schwierig, da sich Betrag und Phase gegenseitig bedingen. Es ist jedoch zu erwarten, dass aufgrund der Abweichungen im Dämpfer eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten nicht abbildbar ist. Insbesondere wird kein Phasenversatz über dem mittleren Phasenversatz nach ISO 10068:2012-12 bei einer Anregungsfrequenz von 23 Hz erreichbar sein.

7.7 Fazit zur Modellierung der heterogenen passiven Anwendereigenschaften im physischen Hand-Arm Modell

Einstellbare Hand-Arm Modelle werden zukünftig eine, zur realen Anwendung vergleichbare und veränderliche aber dennoch reproduzierbare, Abbildung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in Prüfstandversuchen zur entwicklungsbegleitenden Validierung von zum Impulsschrauber-ähnlichen Power-Tools ermöglichen. Innerhalb dieser Arbeit konnten die Einstellbereiche für Trägheiten, Steifigkeiten und Dämpfung eines solchen physischen Hand-Arm Modells identifiziert werden. Es konnte auf Basis einer entwickelten Methode ein völlig neues Konzept eines physischen Hand-Arm Modells entwickelt werden, welches erstmalig eine Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften abbilden kann.

Es konnte anhand von durchgeführten Versuchen gezeigt werden, dass durch das entwickelte Konzept der einstellbaren Feder eine Steifigkeitsverstellung des Hand-Arm Systems im benötigten Rahmen möglich ist. Die gemessenen Werte entsprechen in sehr guter Näherung einer linearen Federkennlinie, so dass das prinzipielle Konzept auch für zukünftige Hand-Arm Modell Implementierungen vielversprechend scheint. Bezüglich der einstellbaren Dämpfung muss festgestellt werden, dass die eingesetzten Dämpfer nur bedingt zur Abbildung der Dämpfungskonstanten im physischen Hand-Arm Modell geeignet sind. Sie zeigen eine hohe Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz. Die geforderten Dämpfungskonstanten können nicht vollumfänglich erreicht werden. Für zukünftige Hand-Arm Modelle sollte hier ein alternatives Konzept angestrebt werden oder ein weites Kennfeld der Dämpfungskonstanten über die weiteren am Markt verfügbaren Dämpfer dieses Typs erhoben werden.

Mit den erreichbaren Parametern für Steifigkeit und Dämpfung wurde eine weitere Optimierung der Modellimpedanzen auf die Impedanz und deren Variation nach ISO 10068:2012-12 im für den hier genutzten Impulsschrauber relevanten Frequenzbereich durchgeführt. Trotz großer Einschränkungen bei der Abbildbarkeit der Dämpfung konnten drei exemplarische Einstellungen des Hand-Arm Modells abgeleitet werden, die einen großen Bereich der Anwenderheterogenität nach ISO

10068:2012-12 im Betrag der Impedanz im Bereich der Gerätehauptfrequenz von 23 Hz abbilden können. Die sich ergebenden Impedanzen in Betrag und Phase der drei Einstellungen korrespondieren sehr gut mit drei verschiedenen Parametersätzen bei der Messung der realen Anwenderimpedanz aus Abschnitt 6.5. Weitere Fälle für Kombinationen von Betrag und Phase der Impedanz können nur im Einzelfall überprüft werden. Eine generelle Aussage der Abbildbarkeit verschiedener Zustände ist schwierig, da sich Betrag und Phase gegenseitig bedingen.

Trotz der Einschränkungen bei der Dämpfungskonstante konnte gezeigt werden, dass sich durch das physische Hand-Arm Modell ein Teil der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in einem zur Unterarm-Achse rotatorisch wirkenden physischen Hand-Arm Modell abbilden lässt. Das Konzept des Zweimassen-Schwingers ist vom Detaillierungsgrad prinzipiell geeignet, die Anforderungen an die Abbildbarkeit der Impedanz bei zeitgleicher beherrschbarer Kompliziertheit der Konstruktion zu erfüllen. Es ist ersichtlich, dass eine Verbesserung in der Ausgestaltung der Dämpfungseigenschaft oder eine genauere Charakterisierung verschiedener Dämpfermodelle am Markt unter der Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methoden noch einmal zu einer erheblichen Verbesserung des Abbildungsumfanges führen können. Schon jetzt ist es mit dem Hand-Arm Modell erstmals möglich, die Impedanzen des Hand-Arm Systems in einem Power-Tool relevanten Frequenzbereich bei periodischen Interaktionen in einer zur Unterarm-Achse rotatorischen Anregung abzubilden. Bezüglich der dritten Forschungsfrage lässt sich somit feststellen:

Forschungsfrage 3: Physische Modellierung der passiven Anwendereigenschaften

Lässt sich die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in einem, zur Unterarm-Achse rotatorisch wirkenden, physischen Hand-Arm Modell für einen Impulsschrauber abbilden?

Ein zur Unterarm-Achse rotatorisch wirkendes Hand-Arm Modell für einen Impulsschrauber, das auf einem Zweimassen-Schwinger basiert, kann durch den Einsatz veränderlicher Steifigkeiten, Dämpfungen und Massenträgheitsmomente dazu genutzt werden, die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften bei einer Anregungsfrequenz von 23 Hz in Grenzen physisch abzubilden. Das physische Hand-Arm Modell weist hierbei ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit der Impedanz in Betrag und Phase auf, so dass ein Einsatz für Power-Tool Prüfstände, die reproduzierbare Beanspruchungen in der entwicklungsbegleitenden Validierung von zu Impulsschrauber ähnlichen Power-Tools erzeugen sollen, zielführend scheint.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Die Subsysteme Anwender, Power-Tool und Werkstück bilden durch ihre Wechselwirkungen ein Gesamtsystem und beeinflussen im Gesamtsystem die Funktion und die Lebensdauer eines Power-Tools. Durch die untrennbaren Wechselwirkungen zwischen den Subsystemen können Power-Tools nur unter ganzheitlicher Betrachtung des Gesamtsystems entwickelt und auf ihre Funktionserfüllung und Lebensdauer im Gesamtsystem getestet werden. Diese Validierung ist eine zentrale Aktivität im Produktentwicklungsprozess, welche nicht als eine abschließende Phase, sondern als kontinuierliche Aktivität im Produktentwicklungsprozess verstanden wird²¹⁸. Ziel dieser kontinuierlichen virtuellen und physischen Validierungsaktivitäten ist es, Erkenntnisse über den Entwicklungsstand zu gewinnen und Handlungsbedarf innerhalb des Produktentwicklungsprozesses abzuleiten. Innerhalb dieser entwicklungsbegleitenden Validierung kann früh Wissen geschaffen werden und es können späte, kostenintensive Iterationen im Produktentwicklungsprozess vermieden werden. Die Testergebnisse können von den Produktentwicklern jedoch nicht immer einfach interpretiert werden, da die Testergebnisse eine Durchmischung des Einflusses der Technik, die überprüft werden soll, und des Einflusses der unbestimmten Anwenderinteraktionen enthalten. Einen in manuellen Tests besonders schwierig zu kontrollierenden Teil dieser unbestimmten Anwenderinteraktionen bilden die passiven Anwenderinteraktionen. Diese sind der Anteil der Anwenderinteraktionen, die dem mechanisch-dynamischen Verhalten des Anwenders entspringen und nicht willentlich vom Anwender kontrolliert werden können.

In Kapitel 5 der Arbeit wurde der **Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf Power-Tools in manuellen Tests** am Beispiel des Bohrhammers und Impulsschraubers untersucht.

²¹⁸ vgl. Albers 2010

Im Zentrum des Kapitels stand die Forschungsfrage:

Haben die passiven Anwendereigenschaften, welche sich durch Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders verändern, einen Einfluss auf einen untersuchten Bohrhämmer und Impulsschrauber in manuellen Tests während der Hauptfunktionserfüllung und können diese zu veränderten Beanspruchungen führen?

Diese Frage kann durch die Arbeit zusammenfassend wie folgt beantwortet werden:

An den beiden Beispielsystemen Bohrhämmer und Impulsschrauber konnte diese Arbeit erstmalig im Stand der Forschung aufzeigen, dass eine Veränderung der passiven Anwendereigenschaften zu einer Veränderung des grundlegenden Bewegungsverhaltens in manuellen Tests während der Hauptfunktionserfüllung führt und deshalb die Beanspruchung des Power-Tools verändern kann.

Um diesen Nachweis zu erbringen wurde eine neue Methode zur Einstellung und Kontrolle der Haltung, der Greif- und der Andruckkraft entwickelt. Hierfür wurde innerhalb der Arbeit ein neuartiger Messgriff für einen Bohrhämmer entwickelt, mit dem die Greif- und die Andruckkraft des Nutzers über ein implementiertes digitales Anzeigesystem kontrolliert und eingestellt werden können. Das Konzept des Messgriffes wurde auf einen Impulsschrauber übertragen und optimiert. Dieser Messgriff ist in seiner integralen Bauweise im Stand der Forschung bislang unerreicht. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Andruck- und Greifkraft sowie die Haltung des Probanden durch die Methoden in dem untersuchungsspezifisch erforderlichen Rahmen reproduzierbar eingenommen werden können. Es wurden komplette Versuchsaufbauten zur Untersuchung des Einflusses der passiven Anwendereigenschaften auf Power-Tools in manuellen Tests für die beiden Beispielsysteme entwickelt und vorgestellt. Die gesamten Methoden wurden am Beispielsystem „Bohrhämmer“ entwickelt und in Versuchen auf deren Anwendbarkeit überprüft. Durch einen Methodenübertrag auf das zweite Beispielsystem „Impulsschrauber“ konnte die Übertragbarkeit der Methoden auf andere Systeme aufgezeigt werden und Methoden Aspekte wie das Anzeigesystem „Soll- und Istwerte“ der Andruck- bzw. Greifkraft für den Probanden substantiell verbessert werden. Dieses Anzeigesystem kann zukünftig in der Forschung universell auf alle Power-Tools angewendet werden, bei denen Greif- und Andruckkräfte gemessen werden.

Durch den Einsatz der entwickelten Methoden konnte in Versuchen nachgewiesen werden, dass bei manuellen Tests die vier Faktoren Greif- und Andruckkraft, Haltung und anthropometrische Charakteristiken bzw. Konstitution des Anwenders, welche die

passiven Anwendereigenschaften verändern, einen Einfluss auf das grundlegende Bewegungsverhalten der hier untersuchten Power-Tools haben. Hierdurch ist das erste Mal im Stand der Forschung der Nachweis erbracht worden, dass die variierenden passiven Anwendereigenschaften gemäß den vorgestellten Grundannahmen die Beanspruchung der hier untersuchten Power-Tools verändern können.

Um die durch die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften induzierten Unsicherheiten in kontinuierlichen physischen und virtuellen Validierungsaktivitäten innerhalb des Produktentwicklungsprozesses von Power-Tools zu reduzieren, ist der Einsatz von virtuellen und physischen Modellen zur Beschreibung der mechanisch-dynamischen Interaktionen (von so genannten Hand-Arm Modellen) sinnvoll. Um eine Entwicklung zu vermeiden, die auf ein einziges Anwendermodell optimiert ist, müssen die Anwendermodelle in Prüfständen im anwendungsspezifischen Rahmen ein- bzw. verstellbar sein²¹⁹.

Um diesen anwendungsspezifischen Rahmen beschreiben zu können, wurden in Kapitel 6 dieser Arbeit **Methoden zur Untersuchung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften** entwickelt, mit denen sich die passiven Anwendereigenschaften erstmals direkt am Griff eines Impulsschraubers untersuchen lassen.

Für dieses Kapitel wurde folgende Forschungsfrage formuliert:

In welcher Weise werden die passiven Anwendereigenschaften durch die Veränderung der Greif- und Andruckkraft, der Haltung und der anthropometrischen Charakteristiken bzw. der Konstitution des Anwenders bei der Benutzung eines Impulsschraubers beeinflusst?

²¹⁹ vgl. Bruchmüller et al. 2015

Die Frage lässt sich wie folgt zusammenfassend beantworten:

Es konnte im Stand der Forschung erstmalig durch diese Arbeit die Impedanz des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase direkt bei der Nutzung eines Impulsschraubers in exemplarischen Anwendungsszenarien bei der Hauptfrequenz des Power-Tools bestimmt werden. Innerhalb der Versuche konnte gezeigt werden, dass Haltung, Greifkraft und Proband sowohl den Betrag als auch die Phase der Impedanz des Hand-Arm Systems bei der Nutzung eines Impulsschraubers verändern. Es wurde nachgewiesen, dass die gemessene Phase der Impedanz von den angegebenen Grenzen der aktuellen Normung in ISO 10068:2012-12 nach unten abweicht.

Zur Erbringung dieser Nachweise wurde dem Stand der Forschung durch diese Arbeit eine neue Untersuchungsmethode bereitgestellt, um die passiven Anwendereigenschaften direkt am Impulsschraubergriff zu erforschen. Mit dieser ist es erstmalig möglich, die passiven Anwendereigenschaften bei einer zum Impulsschraubergriff vergleichbaren Außenkontur in realitätsnahen Anwenderhaltungen zu erforschen. Ein Novum bildet zudem die Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften in einer Drehbewegung. Der in Kapitel 5 dieser Arbeit vorgestellte neuartige Messgriff eines Impulsschraubers, welcher die Erfassung der Beschleunigung und der resultierenden Kraft zwischen Griff und Hand nahe des Handmittelpunktes ermöglicht, bildet die Basis der entwickelten Methode. Bei der Entwicklung der Algorithmen der Methode wurden bekannte Zusammenhänge zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften aus dem Stand der Forschung aufgegriffen und auf die spezifische Fragestellung der Messung von passiven Anwendereigenschaften direkt am Impulsschraubergriff hin weiterentwickelt. Hierdurch entstand eine über den Stand der Forschung hinausgehende Methode, die auf die spezifischen Fragestellungen der Untersuchung von passiven Anwendereigenschaften in einer durch Drehung hervorgerufenen Bewegung angepasst ist. Zur Absicherung der Untersuchungsmethode wurden Validierungstechniken des Stands der Forschung an die Methode angepasst und die Methode hiermit umfänglich verifiziert.

Mit Hilfe der Methode konnte die Impedanz des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase quantitativ bei der Nutzung eines Impulsschraubers bestimmt werden. Durch die neu entwickelte Methode war es erstmalig möglich, innerhalb der Versuche eine Abnahme der Vibrationsstärke bei der Power-Tool-Hauptfrequenz mit einer Zunahme des Betrags der Impedanz des Hand-Arm Systems oder einer Zunahme der Phase der Impedanz zu verknüpfen. Die Daten lassen den Schluss zu, dass eine Veränderung in Betrag und / oder Phase der Impedanz mit einer Veränderung des grundlegenden Bewegungsverhaltens und somit mit einem veränderten

Beanspruchungszustand des untersuchten Impulsschraubers einhergehen können. Es konnte festgestellt werden, dass sich das grundlegende Bewegungsverhalten stärker durch die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften beeinflussen lässt als durch die Variation der Impedanzen in ISO 10068:2012-12 zu erwarten ist.

In Kapitel 7 dieser Arbeit wurde eine Methode vorgestellt, mit der die **Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in einem physischen Modell für eine Drehung zur Unterarmachse** am Beispiel des Impulsschraubers abgebildet werden kann.

Im Zentrum des Kapitels stand die Forschungsfrage:

Lässt sich die Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in einem, zur Unterarm-Achse rotatorisch wirkenden, physischen Hand-Arm Modell für einen Impulsschrauber abbilden?

Diese Frage kann durch die Arbeit zusammenfassend wie folgt beantwortet werden:

Innerhalb dieser Arbeit wurde ein völlig neues Konzept eines physischen Hand-Arm Modells entwickelt, welches erstmalig eine Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften durch den Einsatz veränderlicher Steifigkeiten, Dämpfungen und Massenträgheitsmomente für einen Impulsschrauber bei einer Anregungsfrequenz von 23 Hz in Grenzen physisch durch einen Zweimassen-Schwinger abbilden kann.

Basis dieses Modells ist ein Black-Box-Modellierungsansatz aus dem Stand der Forschung. Es konnte erstmalig aufgezeigt werden, dass ein translatorisches Zweimassen-Schwinger Modell durch justierbare Parameter in der Lage ist, die heterogenen passiven Anwendereigenschaften nach ISO 10068:2012-12 abzubilden. Es konnte dargestellt werden, im welchem Rahmen die Parameter dieses Modells zu verändern sind, um die angegebenen Grenzen der heterogenen passiven Anwendereigenschaften abzubilden.

Bei der Überführung der theoretischen Modelle in physische Modelle treten bei rotierend anregenden Geräten die Kernherausforderungen der sehr kleinen Massen, die schwierige Lagerung der bewegten Massen und die Herausforderung der nötigen grifffesten Orientierung des Hand-Arm Modells auf. Innerhalb dieser Arbeit wurde eine neuartige Methode entwickelt, um theoretische translatorische Hand-Arm Modelle in physische Hand-Arm Modelle für Power-Tools mit einer zur Unterarmachse drehenden Bewegung zu überführen, und hierbei die drei größten Herausforderungen des Stands der Forschung zu lösen. Die Arbeit zeigt hierfür ebenfalls ein iteratives Vorgehensmodell zur Definition der Komponenten eines solchen Hand-Arm Modells auf. Mit diesen Methoden wurde ein rotatorisch wirkendes Hand-Arm Modell entwickelt, das auf einem Zweimassen-Schwinger basiert, und durch den Einsatz

veränderlicher Steifigkeiten, Dämpfungen und Massenträgheitsmomente die heterogenen passiven Anwendereigenschaften abbilden kann. Die vorgestellten Lösungen zur kontinuierlichen Verstellung dieser Parameter in einem physischen Hand-Arm Modell sind bislang einzigartig im Stand der Forschung.

Um ein bestmögliches Systemverständnis aufzubauen, wurden innerhalb dieser Arbeit neben der reinen Modellimpedanz die Subsysteme Dämpfer und Steifigkeit dynamisch identifiziert. Hierfür wurden Prüfaufbauten und Algorithmen entwickelt, die für folgende Forschungsarbeiten an rotatorischen Dämpfern übernommen werden können. Anhand von durchgeführten Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass durch das entwickelte Konzept der einstellbaren Feder eine Steifigkeitsverstellung des Hand-Arm Systems im benötigten Rahmen möglich ist und dass das prinzipielle Konzept auch für zukünftige Hand-Arm Modell Implementierungen vielversprechend ist. Bezüglich der einstellbaren Dämpfung muss festgestellt werden, dass die eingesetzten Dämpfer die geforderten Dämpfungskonstanten nicht vollumfänglich erreichen. Für zukünftige Hand-Arm Modelle sollte hier ein alternatives Konzept angestrebt werden oder ein weites Kennfeld der Dämpfungskonstanten über die weiteren am Markt verfügbaren Dämpfer dieses Typs erhoben werden.

Trotz großer Einschränkungen bei der Abbildbarkeit der Dämpfung, konnten drei exemplarische Einstellungen des Hand-Arm Modells abgeleitet werden, die einen großen Bereich der Anwenderheterogenität nach ISO 10068:2012-12 im Betrag der Impedanz im Bereich der Gerätehauptfrequenz von 23 Hz abbilden können. Das physische Hand-Arm Modell weist in den Versuchen ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit der Impedanz in Betrag und Phase auf, sodass ein Einsatz in Prüfständen für Impulsschrauber-ähnliche Power-Tools, die veränderliche aber reproduzierbare Beanspruchungen in der entwicklungsbegleitenden Validierung erzeugen sollen, zielführend scheint.

8.2 Ausblick

In Bild 8-1 sind die Forschungsbedarfe, welche in dieser Arbeit aufgedeckt wurden, entlang des IPEK Power-Tool Prüffeldes, das Kernbestandteil des von der DFG geförderten Forschungsgrößengerätes „Validierungsumgebung für handgehaltene Geräte“ ist, zusammenfassend illustriert.

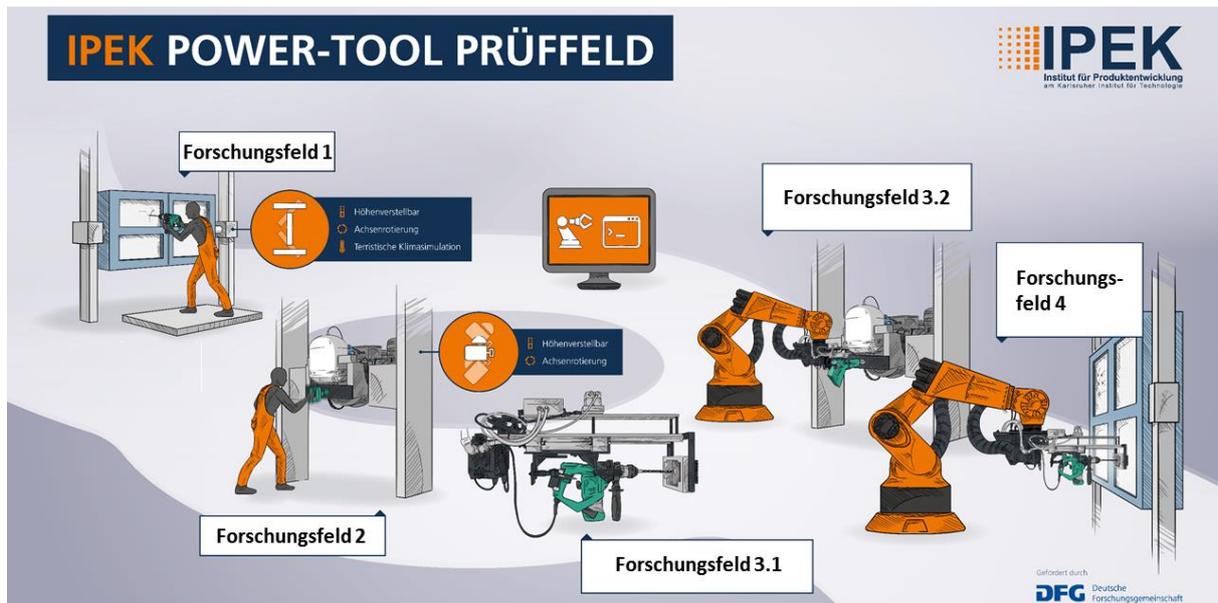


Bild 8-1: Mögliche zukünftige Forschungsfelder am IPEK (vgl. IPEK INSIDE²²⁰)

8.2.1 Forschungsfeld 1: Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf Power-Tools und deren Beanspruchung in manuellen Tests

Es konnte innerhalb der Arbeit gezeigt werden, dass die Messung der Greif- und Andruckkräfte ein essentieller Bestandteil der Untersuchung zum Einfluss der passiven Anwendereigenschaften auf Power-Tools ist. Bislang sind die auftretenden Bedienmomente, die genaue Greifkraftverteilung oder auch der Kontaktflächeneinfluss anhand der vorgestellten Methoden nicht erfassbar. Forschungsansätze ergeben sich hier durch den Einsatz von Druckverteilungsmessfolien, die um den Griff gelegt werden und eine erweiterte Erfassung von Greif- und Andruckkräften ermöglichen. Hier kann die Entwicklung von Methoden zur formalisierten bzw. teilautomatisierten Aufteilung in Greif- und Bedienkräfte bzw. -momente aus Druckverteilungsmessdaten eine wissenschaftliche Lücke schließen.

In der Arbeit konnte weiter festgestellt werden, dass zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften eine reproduzierbare Abbildung der Umwelt nötig ist. Durch eine physische, reproduzierbare Abbildung der Werkstückwechselwirkungen in Modellen (bspw. Modelle für den Kontakt zwischen Wand und Bohrer oder Modelle

²²⁰ Albers et al. 2017, S. 14

einer Schraubenverbindung) könnte die Aussagequalität bezüglich des Einflusses der Anwenderwechselwirkungen auf Power-Tools deutlich gesteigert werden.

Die entwickelten Methoden zur Untersuchung der passiven Anwenderwechselwirkungen sollten in zukünftigen Forschungsprojekten auf weitere Power-Tools übertragen werden. So ist der Einfluss der passiven Anwendereigenschaften bei einer multiaxialen Anregung forschungsseitig von großem Interesse. Des Weiteren können Aufschlüsse über den Einfluss der passiven Anwendereigenschaften bei einer Zweihand-Bedienung eine Forschungslücke schließen.

Nicht zuletzt wäre in diesem Forschungsfeld die Entwicklung von Methoden zur Implementierung von Kraftmesstechnik zur Quantifizierung der Beanspruchung im inneren der Power-Tools forschungsseitig sehr hilfreich, um in Versuchen zeitaufgelöste und nicht integrale Messgrößen für die Power-Tool Beanspruchung ermitteln zu können.

8.2.2 Forschungsfeld 2: Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften

Mit den entwickelten Methoden zur Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften ist erstmals die Untersuchung der Impedanz des Hand-Arm Systems in Betrag und Phase direkt bei der Nutzung eines Impulsschraubers in exemplarischen Anwendungsszenarien bei der Hauptfrequenz des Power-Tools möglich. Für die zukünftige Forschung wäre eine sehr schnelle Erfassung der Impedanz im Betrieb des Impulsschraubers sehr hilfreich. Dies kann durch den Ansatz der Errechnung der Impedanz aus der kontinuierlichen Fourier-Analyse gelingen. Hierdurch können Einflüsse auf die Anwenderimpedanz sehr viel schneller über den zeitlichen Verlauf erkannt werden. Eine Forschungslücke wäre hier auch durch eine kombinierte Messung der Impedanz mit Motion-Tracking zu schließen. Hierdurch können die Anwenderhaltungen in realen Anwendungsszenarien schnell mit den gemessenen Impedanzen in Verbindung gebracht werden. Durch eine geeignete Modellbildung des Impulsschraubers könnte es zukünftig zudem gelingen, auf die Messung der Leerimpedanz in verschiedenen Anwendungsszenarien zu verzichten.

Eine große Forschungslücke ergibt sich aufgrund fehlender Daten für die Impedanz des Hand-Arm Systems über einen ganzen Frequenzbereich bei zur Unterarm-Achse rotatorisch anregenden Bewegungen. Hier bildet die systematische Untersuchung der passiven Anwendereigenschaften und deren Heterogenität ein großes Forschungsziel. Am IPEK steht hierzu zukünftig ein Ersatz-Anregungs-System für die Untersuchung des menschlichen Hand-Arm Systems zur Verfügung. Der Handgriff am Ersatz-Anregungs-System kann hierbei identisch zum Handgriff eines Impulsschrauber-ähnlichen Power-Tools schwingen. Das System ermöglicht eine sehr

genaue Messung der Impedanz in Betrag und Phase. Zudem lässt sich die Frequenz und Amplitude der Anregung in weitem Rahmen verändern, um Power-Tool Entwicklungsalternativen zu simulieren. Das Ersatz-Anregungs-System erlaubt hierbei die Einnahme verschiedener Armhaltungen durch den Anwender. Somit können die Versuche aus Kapitel 6 dieser Arbeit verallgemeinernd weitergeführt werden. Hier sind aus dem, der vorliegenden Arbeit entsprungenen, DFG Vorhaben „Ermittlung des rotatorischen Schwingungsverhaltens von Hand-Arm Systemen im Kontext der nutzerzentrierten Produktentwicklung“ zukünftig große Fortschritte bei der Erforschung der passiven Anwendereigenschaften zu erwarten. Forschungsseitig sehr relevant ist die Vergleichbarkeit der Messungen an einem solchen Ersatz-Anregungs-System zu den Messungen direkt am Power-Tool.

8.2.3 Forschungsfeld 3: Abbildung der Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften in einem physischen Modell

Innerhalb dieser Arbeit konnte ein physisches Hand-Arm Modell entwickelt und aufgebaut werden, welches erstmalig eine Heterogenität der passiven Anwendereigenschaften durch den Einsatz veränderlicher Steifigkeiten, Dämpfungen und Massenträgheitsmomente am Beispiel eines Impulsschraubers abbildet. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Entwicklung der Methode und der Überprüfung der Methode bei der Abbildung der Impedanz des Hand-Arm Systems bei der Hauptfrequenz des untersuchten Impulsschraubers bei 23 Hz lag, wurde eine Auslegung und Identifikation der Impedanz des Modells nur in einem begrenzten Frequenzbereich vorgenommen. Hieran sollte eine weitere Forschungsarbeit anknüpfen, welche die Optimierung des Hand-Arm Modells auf weitere Frequenzen zum Ziel hat. Durch das am IPEK vorhandene Ersatz-Anregungs-System kann die Impedanz des Modells in Betrag und Phase, ähnlich zu den Untersuchungen in Kapitel 7, im hohen Frequenzbereich bis 500 Hz vermessen werden.

Bei der Identifikation der Steifigkeiten und Dämpfer im entwickelten Hand-Arm Modell konnten einige Forschungsbedarfe aufgezeigt werden, die Basis zukünftiger Arbeiten sein sollten. So sind die Steifigkeiten des Hand-Arm Modells nicht im gesamten theoretisch optimalen Rahmen verstellbar. Hier sollte eine Überarbeitung des Hand-Arm Modells erfolgen, so dass eine weichere Feder aufgenommen werden kann. Die Abbildbarkeit der theoretisch optimalen Dämpfung stellt eine weitere große Forschungslücke dar. Innerhalb der Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine Verbesserung in der Ausgestaltung der Dämpfungseigenschaften und/oder eine genauere Charakterisierung verschiedener Dämpfermodelle am Markt unter der Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methoden noch einmal zu einer erheblichen Verbesserung des Abbildungsumfanges führen kann. Nicht zuletzt ist auch eine automatisierte Verstellung der Dämpfer und Federeigenschaften ein

anzustrebendes Forschungsziel, um verschiedene Anwendungsszenarien in einer automatisierten Power-Tool Validierung zu ermöglichen.

An der Stelle der einstellbaren Feder- und Dämpferelemente greift auch das, zum Teil auf den in dieser Arbeit geleisteten Vorarbeiten basierende, laufende DFG Vorhaben „AIProVE – Entwicklung eines einstellbaren Impedanzelementes zur Validierung von Produkten in nachgiebigen Systemen“ an. Zur Modellierung der Heterogenität des Anwenders in einstellbaren Hand-Arm Modellen werden in diesem Forschungsvorhaben einstellbare Elemente für Steifigkeiten und Dämpfungen entwickelt, welche Lösungsansätze für die gefundenen Forschungsbedarfe bieten werden. Auf Basis der innerhalb dieses DFG-Forschungsvorhabens gefundenen Lösungsansätze sollte auch die Entwicklung eines translatorischen Hand-Arm Modells in den Forschungsmittelpunkt rücken.

8.2.4 Forschungsfeld 4: Einsatz von Hand-Arm Modellen zur Validierung von Power-Tools

Das Forschungsfeld 4 zeigt die konsequente Fortsetzung dieser Forschungsarbeit auf. Die entwickelten Hand-Arm Modelle können in zukünftigen Forschungsarbeiten dazu genutzt werden, Power-Tools mit Hilfe eines Manipulators automatisiert und reproduzierbar zu prüfen. Hierzu ist neben der Entwicklung weiterer Hand-Arm Modelle und deren Optimierung auch der Nachweis zu erbringen, dass sich ein Hand-Arm Modell über den Lebensdauertest eines Power-Tools hinweg nicht selbst verändert. Ebenso sind weitreichende Forschungen zur Abbildung des aktiven Anwenderverhaltens notwendig, um eine äquivalente Abbildung der Bewegung am Manipulator zu ermöglichen. Für diese Untersuchungen werden zudem weitere Power-Tools mit integrierter, zeitlich hochauflösender Messtechnik an der Schnittstelle zwischen Anwender bzw. Hand-Arm Modell und Power-Tool benötigt, um eine Äquivalenz der wirkenden Kräfte zu handgehaltenen Versuchen in der Validierungsumgebung nachweisen zu können.

Die vorliegende Arbeit basiert zum Teil auf der Grundannahme, dass das Bewegungsverhalten des Power-Tools mit der Beanspruchung des Power-Tools verknüpft ist. Mit Hilfe einer solchen Validierungsumgebung wird es erstmalig mit Hilfe von statistischen Versuchen bis zum Lebensdauerende der Power-Tools möglich sein, diese Grundannahme experimentell abzusichern.

Erkenntnisse aus diesen Versuchen werden es ermöglichen, diejenigen in der Entwicklung von Power-Tools kontinuierlich und parallel zur Konstruktion durchgeführten Validierungsaktivitäten zu unterstützen, welche zu einem frühestmöglichen Erkenntnisgewinn führen und hierdurch späte kostenintensive Iterationen vermeiden.

9 Literaturverzeichnis

Abrams und Suggs 1977

Abrams, C. F.; Suggs, C. W.: Development of a simulator for use in the measurement of chain saw vibration. In: *Applied ergonomics* 8 (3), S. 130–134, 1977.

Adewusi et al. 2010

Adewusi, S. A.; Rakheja, S.; Marcotte, P.; Boutin, J.: Vibration transmissibility characteristics of the human hand–arm system under different postures, hand forces and excitation levels. In: *Journal of Sound and Vibration* 329 (14), S. 2953–2971, 2010.

Adewusi et al. 2012

Adewusi, S.; Rakheja, S.; Marcotte, P.: Biomechanical models of the human hand–arm to simulate distributed biodynamic responses for different postures. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 42 (2), S. 249–260, 2012.

Adewusi et al. 2014

Adewusi, S.; Thomas, M.; Vu, V. H.; Li, W.: Modal parameters of the human hand–arm using finite element and operational modal analysis. In: *Mechanics & Industry* 15 (6), S. 541–549, 2014.

Albers 2010

Albers, A.: Five hypotheses and a meta model of engineering design processes. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE 2010, Bd. 1*, S. 343–356, 2010.

Albers et al. 2015

Albers, A.; Matros, K.; Behrendt, M.; Jetzinger, H.: Das Pull-Prinzip der Validierung – Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. In: Birkhofer, H., Feldhusen, J. und Lindemann, U. (Hg.): *Konstruktion. Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe*. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag (Juni 6-2015), S. 74–81, 2015.

Albers et al. 2016

Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S.; Matros, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Lindemann, U. (Hg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag, S. 541–569, 2016.

Albers et al. 2017

Albers, A.; Matthiesen, S.; Ott, S.: IPEK INSIDE. NEWSLETTER DES IPEK – INSTITUT FÜR PRODUKTENTWICKLUNG. Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka (Hg.), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017.

Albers und Düser 2008

Albers, A.; Düser, T.: Integrierte Validierungsumgebung für energieeffiziente Fahrerassistenzsysteme am Rollenprüfstand. In: *IPG Technology Conference 2008, 23.-24.9.2008, Ettlingen, Germany, 2008*.

Aldien et al. 2006

Aldien, Y.; Marcotte, P.; Rakheja, S.; Boileau, P.-E.: Influence of hand–arm posture on biodynamic response of the human hand–arm exposed to zh-axis vibration. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 36 (1), S. 45–59, 2006.

Arthurs und Andrews 2009

Arthurs, K. L.; Andrews, D. M.: Upper extremity soft and rigid tissue mass prediction using segment anthropometric measures and DXA. In: *Journal of Biomechanics* 42 (3), S. 389–394, 2009.

Ay et al. 2010

Ay, H.; Luscher, A.; Sommerich, C.: Design and Development of a Torque Tool Testing Rig that Simulates Human Operator-Tool-Task Interactions. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 54 (15), S. 1164–1168, 2010.

Ay et al. 2013

Ay, H.; Sommerich, C. M.; Luscher, A. F.: Linear modeling of human hand-arm dynamics relevant to right-angle torque tool interaction. In: *Human factors* 55 (5), S. 893–910, 2013.

Besa et al. 2007

Besa, A. J.; Valero, F. J.; Suñer, J. L.; Carballeira, J.: Characterisation of the mechanical impedance of the human hand–arm system: The influence of vibration direction, hand–arm posture and muscle tension. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 37 (3), S. 225–231, 2007.

Bruchmüller et al. 2015

Bruchmüller, T.; Mangold, S.; Matthiesen, S.; Oltmann, J.; Rasmussen, O.; Krause, D. et al.: An Adjustable Impedance Element – System Requirements and Design Approach. In: Krause, D., Paetzhold, K. und Wartzack, S. (Hg.): *Design for X*. Beiträge zum 26. DfX Symposium, Bd. 26. Hamburg: TuTech Innovation, S. 133–144, 2015.

Burström 1997

Burström, L.: The influence of biodynamic factors on the mechanical impedance of the hand and arm. In: *International archives of occupational and environmental health* 69 (6), S. 437–446, 1997.

Byström et al. 1982

Byström, B.-O.; Nilsson, A.; Olsson, E.: Development of artificial hands for use in chain saw vibration measurement. In: *Journal of Sound and Vibration* 82 (1), S. 111–117, 1982.

Cronjäger et al. 1984

Cronjäger, L.; Jahn, R.; Riederer, H.: Entwicklung eines Versuchsstandes zur reproduzierbaren Messung der Vibration schlagender handgeführter Maschinen. Opladen: Westdt. Verl. (Nordrhein-Westfalen: Forschungsberichte des Landes, 3185), 1984.

Dong et al. 2001

Dong, R. G.; Rakheja, S.; Schopper, A. W.; Han, B.; Smutz, W. P.: Hand-transmitted vibration and biodynamic response of the human hand-arm: A critical review. In: *Critical Reviews in Biomedical Engineering* 29 (4), S. 393–439, 2001.

Dong et al. 2005

Dong, R. G.; Wu, J. Z.; Welcome, D. E.: Recent advances in biodynamics of human hand-arm system. In: *Industrial health* 43 (3), S. 449–471, 2005.

Dong et al. 2006a

Dong, R. G.; Welcome, D. E.; McCormick, R. E.: 3-D Laboratory Simulation of Hand-transmitted Vibration. In: *24th Conference and Exposition on Structural Dynamics 2006*. Bethel, Connecticut: Society for Experimental Mechanics, S. 1636–1644, 2006.

Dong et al. 2006b

Dong, R. G.; Welcome, D. E.; McDowell, T. W.; Wu, J. Z.: Measurement of biodynamic response of human hand-arm system. In: *Journal of Sound and Vibration* 294 (4), S. 807–827, 2006.

Dong et al. 2007

Dong, R. G.; Dong, J. H.; Wu, J. Z.; Rakheja, S.: Modeling of biodynamic responses distributed at the fingers and the palm of the human hand-arm system. In: *Journal of Biomechanics* 40 (10), S. 2335–2340, 2007.

Dong et al. 2008

Dong, R. G.; Welcome, D. E.; Wu, J. Z.; McDowell, T. W.: Development of hand-arm system models for

vibrating tool analysis and test rig construction. In: *Noise Control Engineering Journal* 56 (1), S. 35–44, 2008.

Dong et al. 2010

Dong, R. G.; Rakheja, S.; McDowell, T. W.; Welcome, D. E.; Wu, J. Z.: Estimation of the biodynamic responses distributed at fingers and palm based on the total response of the hand–arm system. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 40 (4), S. 425–436, 2010.

Dong et al. 2012

Dong, R. G.; Welcome, D. E.; Xu, X. S.; Warren, C.; McDowell, T. W.; Wu, J. Z.; Rakheja, S.: Mechanical impedances distributed at the fingers and palm of the human hand in three orthogonal directions. In: *Journal of Sound and Vibration* 331 (5), S. 1191–1206, 2012.

Dong et al. 2013

Dong, R. G.; Welcome, D. E.; McDowell, T. W.; Wu, J. Z.: Modeling of the biodynamic responses distributed at the fingers and palm of the hand in three orthogonal directions. In: *Journal of Sound and Vibration* 332 (4), S. 1125–1140, 2013.

Dong et al. 2015

Dong, R. G.; Sinsel, E. W.; Welcome, D. E.; Warren, C.; Xu, X. S.; McDowell, T. W.; Wu, J. Z.: Review and Evaluation of Hand–Arm Coordinate Systems for Measuring Vibration Exposure, Biodynamic Responses, and Hand Forces. In: *Safety and Health at Work* 6 (3), S. 159–173, 2015.

Fritz 1991

Fritz, M.: An improved biomechanical model for simulating the strain of the hand–arm system under vibration stress. In: *Journal of Biomechanics* 24 (12), S. 1165–1171, 1991.

Gurram et al. 1995a

Gurram, R.; Rakheja, S.; Brammer, A. J.: Driving-point mechanical impedance of the human hand–arm system. Synthesis and model development. In: *Journal of Sound and Vibration* 180 (3), S. 439–458, 1995.

Gurram et al. 1995b

Gurram, R.; Rakheja, S.; Gouw, G. J.: Mechanical impedance of the human hand–arm system subject to sinusoidal and stochastic excitations. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 16 (2), S. 135–145, 1995.

Gurram et al. 1996

Gurram, R.; Rakheja, S.; Boileau, P. E.; Gouw, G. J.: Development of a grip force dependent hand–arm vibration model. In: *Central European journal of public health* 4 (1), S. 65–68, 1996.

Guzzella et al. 1993

Guzzella, L.; Schaer, R.; Richter, M.: Aktive Nachbildung des menschlichen Hand-Arm-Systems. In: *Intelligente Steuerung und Regelung von Robotern*. Langen, 9. - 10. November 1993. Tagung Intelligente Steuerung und Regelung von Robotern. Nichtredigierter Manuskriptdruck. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 1094), S. 615–624, 1993.

Hansson und Kihlberg 1983

Hansson, J. E.; Kihlberg, S.: A test rig for the measurement of vibration in hand-held power tools. In: *Applied ergonomics* 14 (1), S. 11–18, 1983.

Heyden et al. 2018

Heyden, E.; Lindenmann, A.; Oltmann, J.; Bruchmueller, T.; Krause, D.; Matthiesen, S.: Adjustable impedance elements for testing and validation of system components. In: Zogg, M., Krause, D., Ermanni, P., Wartzack, S. und Meboldt, M. (Hg.): *Book of Abstracts. Symposium Lightweight Design in Product Development, Zurich, 14.06. - 15.06.2018*: ETH Zurich, 2018.

Joshi et al. 2008

Joshi, A.; Guttenberg, R.; Leu, M.; Murray, S.: Modeling of the hand–arm system for impact loading in shear fastener installation. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 38 (9-10), S. 715–725, 2008.

Keppler 2003

Keppler, V.: Biomechanische Modellbildung zur Simulation zweier Mensch-Maschinen-Schnittstellen. Dissertation. Tübingen: Universität Tübingen, 2003.

Kinetrol Ltd. 2018

Kinetrol Ltd.: Model KD 60° Vane Dashpot. Hg. v. Kinetrol Ltd. 2018. Online verfügbar unter http://www.kinetrol.com/damper/model/dashpot_model_kd.html, zuletzt geprüft am 02.07.2018.

King et al. 2011

King, M. A.; Glynn, J. A.; Mitchell, S. R.: Subject-specific computer simulation model for determining elbow loading in one-handed tennis backhand groundstrokes. In: *Sports biomechanics* 10 (4), S. 391–406, 2011.

Kinne 2012

Kinne, J.: Praxisnah ermittelte Impedanzverläufe zur Nutzung für biomechanische Modellierungen der beiden menschlichen Hand-Arm-Systeme. Dissertation. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2012.

Kinne und Melzig-Thiel 1993

Kinne, J.; Melzig-Thiel, R.: Mechanical Models of the Hand-arm System for Testing Hand-held Tools. In: Dupuis, H. (Hg.): *Proceedings / 6th International Conference on Hand-Arm Vibration*. Bonn, Federal Republic of Germany, May 19. - 22., 1992. Sankt Augustin: HVBG (Schriftenreihe des Hauptverbandes der Gewerblichen Berufsgenossenschaften), S. 577–582, 1993.

Lin et al. 2003

Lin, J.-H.; Radwin, R. G.; Richard, T. G.: A single-degree-of-freedom dynamic model predicts the range of human responses to impulsive forces produced by power hand tools. In: *Journal of Biomechanics* 36 (12), S. 1845–1852, 2003.

Lin et al. 2007

Lin, J.-H.; McGorry, R. W.; Chang, C.-C.: Hand-handle interface force and torque measurement system for pneumatic assembly tool operations. Suggested enhancement to ISO 6544. In: *Journal of occupational and environmental hygiene* 4 (5), S. 332–340, 2007.

Mac Panther GmbH 2018

Mac Panther GmbH: Website des Unternehmens. Bremen 2018. Online verfügbar unter <https://www.macpanther.de/pruefstaende.php>, zuletzt geprüft am 14.08.2018.

Makita Werkzeuge GmbH 2016

Makita Werkzeuge GmbH: Akku-Kombihammer für SDS-PLUS 18 V / 4,0 Ah DHR243RMJ. Hg. v. Makita Werkzeuge GmbH 2016. Online verfügbar unter <http://www.makita.de/>, zuletzt geprüft am 25.05.2016.

MakitaCorporation 2016

MakitaCorporation: DTS141. This movie explain DTS141 Cordless Oil-Pulse Driver., 2016.

Marcotte et al. 2005

Marcotte, P.; Aldien, Y.; Boileau, P.-É.; Rakheja, S.; Boutin, J.: Effect of handle size and hand–handle contact force on the biodynamic response of the hand–arm system under zh-axis vibration. In: *Journal of Sound and Vibration* 283 (3), S. 1071–1091, 2005.

Marcotte et al. 2010

Marcotte, P.; Boutin, J.; Jasinski, J.: Development of a hand–arm mechanical analogue for evaluating

chipping hammer vibration emission values. In: *Journal of Sound and Vibration* 329 (10), S. 1968–1980, 2010.

Matthiesen et al. 2012

Matthiesen, S.; Mangold, S.; Schäfer, T.: Modellierung und Simulation des Hand-Arm-Systems bei stoßartiger Anregung. In: Krause, D., Paetzhold, K. und Wartzack, S. (Hg.): *Design for X*. Beiträge zum 23. DfX-Symposium Oktober 2012. Hamburg: TuTech-Verl., S. 113–124, 2012.

Matthiesen et al. 2014

Matthiesen, S.; Mangold, S.; Bruchmüller, T.; Marko, A.-M.: Der Mensch als zentrales Teilsystem in Wechselwirkung mit handgehaltenen Geräten – Ein problemorientierter Ansatz zur Untersuchung dieser Schnittstelle. In: Krause, D., Paetzhold, K. und Wartzack, S. (Hg.): *Design for X*. Beiträge zum 25. DfX-Symposium, Oktober 2014. Hamburg: TuTech-Verl., S. 193–204, 2014.

Matthiesen et al. 2015

Matthiesen, S.; Mangold, S.; Bruchmueller, T.; Stelzer, D.; Truenkle, B.: THE INFLUENCE OF THE USER ON THE POWER TOOL FUNCTIONALITY - A FORCE SENSING HANDLE FOR A HAMMER DRILL -. In: *The Proceedings of the 13th International Conference on Hand-Arm Vibration. Beijing, China, Oct. 13-16*, S. 89–90, 2015.

Matthiesen et al. 2016a

Matthiesen, S.; Mangold, S.; Zumstein, T.: Ein anpassbares Hand-Arm Modell mit rotatorischem Freiheitsgrad zur Validierung handgehaltener Geräte. In: *6. VDI-Tagung Humanschwingungen 2016*. Würzburg, 26.-27. April 2016. VDI-Tagung Humanschwingungen. Nichtredigierter Manuskriptdruck. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2277), S. 95–109, 2016.

Matthiesen et al. 2016b

Matthiesen, S.; Gwosch, T.; Schäfer, T.; Dültgen, P.; Pelshenke, C.; Gittel, H.-J.: Experimentelle Ermittlung von Bauteilbelastungen eines Power Tool Antriebsstrangs durch indirektes Messen in realitätsnahen Anwendungen als ein Baustein in der Teilsystemvalidierung. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 80 (1-2), S. 17–27, 2016.

Matthiesen et al. 2017a

Matthiesen, S.; Gwosch, T.; Mangold, S.; Grauberger, P.; Steck, M.; Cersowsky, S.: Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017 (SSP 2017) : Produktentwicklung im disruptiven Umfeld, Stuttgart, Deutschland, 29. Juni 2017*, S. 167–176, 2017.

Matthiesen et al. 2017b

Matthiesen, S.; Gwosch, T.; Mangold, S.; Dultgen, P.; Pelshenke, C.; Gittel, H.-J.: Realitätsnahe Komponententests zur Unterstützung der Produktentwicklung bei der Validierung von Power-Tools. In: *Konstruktion* 69 (7-8), S. 76–81, 2017.

Matthiesen et al. 2018a

Matthiesen, S.; Lindenmann, A.; Bruchmüller, T.: Anforderungen an ein Messsystem zur Ermittlung der Rotationsimpedanz von Hand-Arm Systemen. In: *7. VDI-Tagung Humanschwingungen 2018*. Würzburg, 24.-25. April 2018. VDI-Tagung Humanschwingungen. Nichtredigierter Manuskriptdruck. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2322), S. 91–105, 2018.

Matthiesen et al. 2018b

Matthiesen, S.; Mangold, S.; Germann, R.; Schäfer, T.; Schmidt, S.: Hand-arm models for supporting the early validation process within the product development of single impulse operating power tools. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 82 (2), S. 119–129, 2018.

Matthiesen et al. 2018c

Matthiesen, S.; Mangold, S.; Bruchmueller, T.: The influence of varying passive user interactions on power tools in the context of product development. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 82 (2), S. 157–168, 2018.

Matthiesen et al. 2018d

Matthiesen, S.; Behrendt, M.; Gwosch, T.; Bruchmueller, T.; Schaefer, T.: IPEK-XiL-Ansatz und IPEK-XiL-Framework für Power-Tools. Hg. v. Institut für Produktentwicklung (IPEK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KITopen. Karlsruhe, 2018.

Matthiesen 2019

Matthiesen, S.: Prozess und Methoden der Gestaltung. In: Bender, B. und Gericke, K. (Hg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 9. Aufl. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2019. In Print.

Matysek und Kern 2009

Matysek, M.; Kern, T. A.: Entwicklung Haptischer Geräte. Ein Einstieg für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

Meboldt et al. 2012

Meboldt, M.; Matthiesen, S.; Lohmeyer, Q.: The Dilemma of Managing Iterations in Time-to-market Development Processes. In: Heisig, P. und Clarkson, J. (Hg.): *DS 72: Modelling and management of engineering processes*: University of Cambridge, UK, S. 127–140, 2012.

Rakheja et al. 1993

Rakheja, S.; Gurram, R.; Gouw, G. J.: Development of linear and nonlinear hand-arm vibration models using optimization and linearization techniques. In: *Journal of Biomechanics* 26 (10), S. 1253–1260, 1993.

Rakheja et al. 2002

Rakheja, S.; Wu, J. Z.; Dong, R. G.; Schopper, A. W.; Boileau, P.-É.: A COMPARISON OF BIODYNAMIC MODELS OF THE HUMAN HAND-ARM SYSTEM FOR APPLICATIONS TO HAND-HELD POWER TOOLS. In: *Journal of Sound and Vibration* 249 (1), S. 55–82, 2002.

Rempel et al. 2017

Rempel, D.; Barr, A.; Antonucci, A.: A New Test Bench System for Hammer Drills. Validation for Handle Vibration. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 62, S. 17–20, 2017.

Reynolds und Wilson 1983

Reynolds, D. D.; Wilson, F. L.: Mechanical test stand for the measurement of the vibration levels of chain saws during cutting operations. In: *Journal of Sound and Vibration* 88 (1), S. 65–84, 1983.

Schäfer 2018

Schäfer, T.: Ein gesamtsystemischer Ansatz zur simulationsgestützten Analyse und Optimierung eines Bohrhammerschlagwerkes. Dissertation. Karlsruhe: IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Forschungsberichte IPEK, Band 111), 2018.

Schenk und Knoll 1998

Schenk, T.; Knoll, P.: Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Prüfstandsmessungen an handgehaltenen motorisch angetriebenen Geräten zur Beurteilung von Schwingungsbelastungen. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Forschung, 795), 1998.

Schweizer 2004

Schweizer, H. H.: Schlagbohrmaschinen, Bohrhämmer und Diamantbohrmaschinen. 1. Aufl. Hg. v. ROBERT BOSCH GmbH Geschäftsbereich Elektrowerkzeuge. Leinfelden-Echterdingen, 2004.

Seidel 2001

Seidel, E.: Schwingungstechnische Modellierung mechanischer Baugruppen auf der Grundlage von Impedanzmessungen (Modeling Mechanical Vibrations by the Use of Impedance Measurements). In: *tm Technisches Messen* 68 (10/2001), S. 456–464, 2001.

Shibata et al. 2011

Shibata, N.; Ishimatsu, K.; Maeda, S.: Posture-related change in frequency weightings derived from vibration power absorption of the hand-arm system. In: *Canadian Acoustics* 39 (2), S. 98–99, 2011.

Welcome et al. 2004

Welcome, D.; Rakheja, S.; Dong, R.; Wu, J. Z.; Schopper, A. W.: An investigation on the relationship between grip, push and contact forces applied to a tool handle. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 34 (6), S. 507–518, 2004.

Welcome et al. 2011

Welcome, D.; Dong, R.; Xu, X.; Warren, C.; McDowell, T.; Wu, J.: Investigation of the 3-D vibration transmissibility on the human hand-arm system using a 3-D scanning laser vibrometer. In: *Canadian Acoustics* 39 (2), S. 44–45, 2011.

Wood et al. 1978

Wood, L. A.; Suggs, C. W.; Abrams, C. F.: Hand-arm vibration part III. A distributed parameter dynamic model of the human hand-arm system. In: *Journal of Sound and Vibration* 57 (2), S. 157–169, 1978.

Wu et al. 2017

Wu, J. Z.; Welcome, D. E.; McDowell, T. W.; Xu, X. S.; Dong, R. G.: Modeling of the interaction between grip force and vibration transmissibility of a finger. In: *Medical engineering & physics* 45, S. 61–70, 2017.

Normen und Richtlinien

DIN 33402-2:2005-12

DIN 33402-2:2005-12: Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte.

DIN 45677:2001-01

DIN 45677:2001-01: Mechanische Eingangsimpedanz des menschlichen Hand-Arm-Systems.

DIN 45679:2013-02

DIN 45679:2013-02: Mechanische Schwingungen – Messung und Bewertung der Ankopplungskräfte zur Beurteilung der Schwingungsbelastung des Hand-Arm-Systems.

DIN EN 28662:1993-01

DIN EN 28662:1993-01: Handgehaltene, motorbetriebene Maschinen; Messung mechanischer Schwingungen am Handgriff; Allgemeines (ISO 8662-1:1988); Deutsche Fassung EN 28662-1:1992.

DIN EN ISO 10819:2013-12

DIN EN ISO 10819:2013-12: Mechanische Schwingungen und Stöße - Hand-Arm Schwingungen - Messung und Bewertung der Schwingungsübertragung von Handschuhen in der Handfläche (ISO 10819:2013); Deutsche Fassung EN ISO 10819:2013.

EN ISO 5349-1:2001-12

EN ISO 5349-1:2001-12: Mechanische Schwingungen - Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 5349-1:2001); Deutsche Fassung EN ISO 5349-1:2001.

EN ISO 5349-2:2001-12

EN ISO 5349-2:2001-12: Mechanische Schwingungen - Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen - Teil 2: Praxisgerechte Anleitung zur Messung am Arbeitsplatz (ISO 5349-2:2001); Deutsche Fassung EN ISO 5349-2:2001.

ISO 10068:2012-12

ISO 10068:2012-12: Mechanical vibration and shock - Mechanical impedance of the human hand-arm system at the driving point.

VDI-Richtlinie 3831:2006-01

VDI-Richtlinie 3831:2006-01: Schutzmaßnahmen gegen die Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen.

Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

Hahn 1993

Hahn, U.: Entwicklung mehrgliedriger Modelle zur realistischen Simulation dynamischer Prozesse in biologischen Systemen. Diplomarbeit, Universität Tübingen, Tübingen. Lehr- und Forschungsbereich Theoretische Astrophysik, 1993.

Kemper 2013

Kemper, C.: Untersuchung zu Prüfverfahren für Schraubvorgänge mit verschiedenen Anzugsverfahren. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2013.

Zimmermann 2013

Zimmermann, K.: Untersuchung zu Prüfverfahren für Schraubvorgänge mit verschiedenen Anzugsverfahren. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2013.

Vom Autor co-betreute Arbeiten

Hirling 2014

Hirling, G.: Entwicklung eines anpassbaren Hand-Arm-Modells für die Untersuchung handgehaltener Geräte. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014.

Höll 2016

Höll, P.: Einfluss des Anwenders auf die Funktion eines Impulsschraubers. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2016.

Hückstädt 2015

Hückstädt, D.: Entwicklung und Aufbau eines Messgriffes zur Erfassung der mechanisch-dynamischen Wechselwirkungen zwischen Impulsschrauber und Anwender. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015.

Stelzer 2014

Stelzer, D.: Konzeptstudie, Gestaltung und Herstellung eines Griffes für handgehaltene Elektrowerkzeuge zur Erfassung der mechanisch-dynamischen Wechselwirkungen zwischen Anwender und Gerät. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014.

Trünkle 2015

Trünkle, B.: Einfluss des Anwenders auf die Funktion eines Bohrhammers. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015.

Zumstein 2016

Zumstein, T.: Ein adaptives Hand-Arm-Modell mit rotatorischem Freiheitsgrad für die Validierung handgehaltener Geräte. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2016.