

Michael Uhl

**Analyse des Einflusses von  
Querkräften beim Hammerbohren  
auf die Arbeitsproduktivität und  
die Schwingungseinwirkung auf  
den Menschen**

Analysis of the influence of lateral  
forces on work productivity and  
human exposure to vibration during  
hammer drilling

**Band 148**

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen  
(Hrsg.)



Copyright: IPEK • Institut für Produktentwicklung, 2022  
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

# **Analyse des Einflusses von Querkräften beim Hammerbohren auf die Arbeitsproduktivität und die Schwingungseinwirkung auf den Menschen**

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

M.Sc. Michael Uhl

Tag der mündlichen Prüfung: 09.02.2022  
Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Robert Weidner



# Vorwort der Herausgeber

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

\* E.h.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)



## Vorwort zu Band 148

Für die Entwicklung von Mensch-Maschinen-Systemen spielt die Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen den interagierenden Teilsystemen „Mensch“ und „technischem System“ eine entscheidende Rolle. Dies führte in den letzten Jahrzehnten vermehrt zu Bemühungen, die Einflussgrößen auf den Menschen besser zu verstehen und dies bei der Entwicklung der technischen Systeme zu nutzen, um z.B. Belastungen auf den Menschen zu reduzieren.

Bei Bohrhämmern ist die Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen extrem wichtig. Der Mensch wirkt mit Vorschubkraft, Greifkraft und oft ungewollten Querkräften auf den Bohrhämmer. Der Bohrhämmer wiederum wirkt mit Kräften und Vibrationen aus dem Bohrprozess auf den Menschen und beeinflusst diesen wiederum in seinem Umgang mit dem Power-Tool. Arbeitsproduktivität und zugelassene Nutzungsdauer des Bohrhammers hängen von diesen Wechselwirkungen ab.

Aus dem Stand der Forschung ist zwar bekannt, dass Querkräfte beim Hammerbohren vom Anwender auf den Bohrhämmer wirken, allerdings ist unbekannt, wie groß diese Querkräfte beim Arbeiten mit dem Bohrhämmer sind und wie diese das Hammerbohren beeinflussen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Entstehung der Querkräfte zu analysieren und deren Zusammenhang mit Gehäusevibration und Arbeitsproduktivität zu erforschen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können zukünftig Maßnahmen erarbeitet werden, um die Anwenderbelastung zu senken bzw. die Arbeitsproduktivität zu erhöhen und dadurch die Ergonomie von Bohrhämmern zu verbessern.

Um diese Zusammenhänge zu erforschen, führt Herr M.Sc. Michael Uhl zunächst mit professionellen Bohrhämmeranwendern Laborstudien durch. In diesen Studien weist er nach, dass auch bei professionellen Bohrhämmeranwendern Querkräfte auftreten. Außerdem vermisst er die Größe der Querkräfte. Anschließend führt er auf dem roboterbasierten Prüfstand im „IPEK Power-Tool-Prüffeld“ in über 6000 Einzelversuchen Bohrstudien durch, bei denen er den Zusammenhang von Vorschubkräften und Querkräften mit der Produktivität und der Gehäusevibration vermisst. Er variiert in den Versuchen sowohl den Bohrhämmer Typ als auch die Betonfestigkeit, den Typ des Bohrers und seinen Verschleißzustand. Herr Uhl gelingt es dadurch erstmalig nachzuweisen, dass die vom Anwender erzeugten Querkräfte die Arbeitsproduktivität und die für den Menschen schädlichen Vibrationen stark beeinflussen.

Durch die Untersuchungen werden wichtige Beiträge in der Power Tool Forschung geliefert, da erstmalig das Auftreten von Querkräften beim Hammerbohren und deren Einfluss auf den Hammerbohrprozess nachgewiesen werden. Außerdem werden wichtige Ergebnisse erzielt, auf deren Basis die nutzerzentrierte Entwicklung von Bohrhämmern erfolgen kann und erstmalig eine ergonomische Gestaltung von Bohrhämmern unter Berücksichtigung der auftretenden Querkräfte ermöglicht wird. Des Weiteren liefert die Arbeit wichtige Ergebnisse zum Testing von Bohrhämmern. Herr Uhl weist klar nach, dass Verschleiß, Beanspruchung und Vibrationsemission auf den Menschen von den aufbrachten Querkräften abhängen und diese bei Untersuchungen zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus konnten Potentiale für die Optimierung von Schwingungsentkopplungen der Hauptgriffe von Bohrhämmern aufgedeckt werden.

Außerdem sind die Ergebnisse für das Testing von Bohrhämmer und Hammerbohrer unter realitätsnäheren Anwendereinflüssen oder für die Verbesserung von Normen zur Bewertung der Bohrhämmervibrationen extrem wertvoll.

Februar 2022

Sven Matthiesen

## Kurzfassung

Das Ziel der Ergonomie ist die qualitative und wirtschaftliche Optimierung des Arbeitsergebnisses. Gleichzeitig soll der Anwender während der Tätigkeit möglichst wenig ermüden und keine Schäden davontragen. In der Entwicklung von Bohrhämmern sind deshalb die Steigerung der Arbeitsproduktivität sowie die Prävention einer möglichen Schädigung des Anwenders durch Vibrationen wichtige Ziele. Um das Produkt hinsichtlich dieser Größen optimieren zu können, müssen die relevanten Einflüsse bekannt sein. In bisherigen Studien zur Analyse von Einflussgrößen wurden Kräfte, welche senkrecht zur Vorschubkraft wirken, noch nicht untersucht. Experimente haben jedoch gezeigt, dass Anwender beim Hammerbohren Querbewegungen aufbringen, welche zu Querkräften im Bohrloch führen. Bislang fehlt das Wissen, in welcher Größenordnung die Querkräfte beim Arbeiten mit einem Bohrhämmer auftreten und ob diese einen Einfluss auf das Hammerbohren haben. Weiterhin ist nicht bekannt, ob ein möglicher Einfluss auf unterschiedliche Bohrhämmer-Bohrer-Setups und Randbedingungen übertragbar ist.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Zusammenhänge zwischen der Querkraft und den Größen Vorschubgeschwindigkeit sowie die für den Menschen schädlichen Vibrationen zu analysieren. Zur Erreichung dieses Ziels wurden zunächst die auftretenden Querkräfte mittels einer Laborstudie mit Probanden untersucht. Anschließend wurden anhand zweier Studien auf einem roboterbasierten Prüfstand mit über 6000 Einzelversuchen Vorschubkräfte und Querkräfte mehrstufig aufgebracht, um deren Zusammenhang mit der Vorschubgeschwindigkeit sowie mit den Gehäusevibrationen zu ermitteln. Um aufzuzeigen, ob Interaktionseffekte zwischen der Querkraft und aus dem Stand der Forschung bekannter Einflussgrößen bestehen, wurden neben den Anwenderkräften die Betonfestigkeit, der Bohrhämmer, der Bohrertyp und dessen Verschleiß variiert. Abschließend wurde eine Verifikation der auf dem Prüfstand gewonnenen Ergebnisse, inwieweit diese auf das manuelle Hammerbohren übertragbar sind, durchgeführt. Durch manuelle Versuche mit professionellen Anwendern konnte nachgewiesen werden, dass beim Hammerbohren Querkräfte auftreten und wodurch diese entstehen. Die anschließenden kausalen Studien zeigten, dass diese Querkräfte die Vorschubgeschwindigkeit negativ beeinflussen und unterschiedliche Effekte bei den Bohrhämmervibrationen hervorrufen. Hierbei treten Interaktionseffekte zwischen den untersuchten Faktoren und der Querkraft auf.

Anhand der Ergebnisse konnte somit gezeigt werden, dass die vom Anwender erzeugten Querkräfte die Arbeitsproduktivität und die für den Menschen schädlichen Vibrationen beeinflussen. Darüber hinaus konnten Potentiale für die Optimierung von

Schwingungsentkopplungen der Hauptgriffe von Bohrhämmern aufgedeckt werden. Des Weiteren kann das Wissen für die Abbildung von realitätsnäheren Anwendereinflüssen im Testing oder für die Verbesserung von Normen zur Bewertung der Bohrhammervibrationen genutzt werden.

# Abstract

The aim of ergonomics is the qualitative and economic optimization of the work result. At the same time, the user should suffer as little fatigue as possible during the task and should not be caused any harm. Therefore work productivity and prevention of damage to the user due to vibrations are target quantities in the development of hammer drills. In order to optimize the product with regard to these quantities, the relevant influences must be known. In previous studies on the analysis of influencing variables, forces which occur perpendicular to the feed force have not yet been investigated. However, experiments have shown that users apply transverse movements during hammer drilling. So far, there is a lack of knowledge about the magnitude of lateral forces that arise when working with a hammer drill and whether these have an influence on the hammer drill process. Furthermore, it is not known whether a possible influence is transferable to different hammer drill-bit setups and boundary conditions.

The objective of this work is to analyze the relationships between the lateral force and the parameters rate of penetration and vibrations harmful to humans. To achieve this goal, the lateral forces that occur during the drilling process were first investigated by means of a laboratory study with test subjects. Subsequently, by performing two studies on a robot-based test rig with over 6000 individual test runs, feed forces and lateral forces were applied in multiple levels in order to determine their relationship with the rate of penetration as well as hammer drill vibrations. To be able to show whether interaction effects exist between the shear force and influencing variables known from the current state of research, the concrete strength, the hammer drill, the drill bit type and its wear condition were varied in addition to the user forces. Finally, a verification of the results obtained on the test rig was carried out to determine the extent to which they can be transferred to manual hammer drilling. Manual test runs with professional users proved that lateral forces occur during hammer drilling and how they are caused. The subsequent causal studies showed that these lateral forces reduce the rate of penetration and show various effects on the hammer drill vibrations. Here, interaction effects occur between the investigated factors and the lateral force.

Based on the results, it was possible to show that the lateral forces generated by the user during the drilling process influence work productivity and vibrations that are harmful to humans. By means of the gained knowledge, potentials for the optimization of vibration decoupling of the main handles could be revealed. Furthermore, this knowledge can be used for the simulation of more realistic user influences in testing environments or for the improvement of standards for the evaluation of hammer drill vibration.



# Danksagung

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

Besonderen Dank gilt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen. Durch die unzähligen gemeinsamen Gespräche und Diskussionen sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen und die übertragene Verantwortung konnte ich mich fachlich und persönlich weiterentwickeln.

Für die Übernahme des Korreferats und den persönlichen Austausch bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Weidner.

Ich möchte dem gesamten IPEK-Team für die Unterstützung und die fachlichen und persönlichen Gespräche bedanken. Neben den Forschungsgruppen sind hierbei die administrativen und technischen Dienste hervorzuheben. Ein besonderer Dank gilt René Germann, welcher mich als Freund und Kollege die gesamte Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter begleitet und unterstützt hat. Zusätzlich herausheben möchte ich meinen forschungsseitigen Nachfolger Jan-Heinrich Robens, welcher mich in meiner Forschung als wissenschaftlicher Hilfsmitarbeiter und Abschlussarbeiter begleitet hat.

Bei Dr. Aaron Wiedner möchte ich mich für die zahlreichen Diskussionen zu den einzelnen Experimenten und deren Ergebnisinterpretation bedanken.

Für das Korrekturlesen und die konstruktiven Anregungen zu meiner Arbeit danke ich Dr. René Germann, Jan-Heinrich Robens, Carolin Sturm, Sebastian Zimprich, Carolin Briehl und meinem Vater Dr. Herbert Uhl.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern danke ich für liebevolle Erziehung und die gute Ausbildung, welche sie mir ermöglicht haben. Bei meiner Schwester und meinem Bruder bedanke ich mich für ihre Ratschläge und Hilfsbereitschaft. Letztendlich danke ich meiner Verlobten Carolin Briehl für ihr Verständnis und dass sie mir stets den Rücken freigehalten hat, damit ich mich auf meine Forschung konzentrieren konnte.

Oktober 2021

Michael Uhl



“To live is to change, and to be perfect is to have changed often.”  
John Henry Newman, 1801 – 1890



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xix</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>Formelverzeichnis</b> .....	<b>xxv</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation und Fokus der Arbeit.....	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	2
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1 Hammerbohrprozess.....	5
2.2 Das System Bohrhammer.....	5
2.3 Das System Hammerbohrer.....	8
<b>3 Stand der Forschung</b> .....	<b>9</b>
3.1 Definition und Abbildung der Anwenderkräfte.....	10
3.1.1 Definition der Körperkräfte des Menschen.....	10
3.1.2 Definition der Power-Tool-spezifischen Anwenderkräfte.....	12
3.1.3 Abbildung der Anwenderkräfte auf Prüfständen.....	15
3.1.4 Fazit.....	19
3.2 Einflussgrößen auf die Produktivität beim Hammerbohren.....	20
3.2.1 Einfluss des Anwenders.....	21
3.2.2 Einfluss des technischen Systems.....	23
3.2.3 Einfluss des Untergrundes.....	26
3.2.4 Zwischenfazit.....	31
3.3 Einflussgrößen auf die Belastung des Anwenders durch Vibrationen.....	32
3.3.1 Einfluss des Anwenders.....	33
3.3.2 Einfluss des technischen Systems.....	36
3.3.3 Einfluss des Untergrundes.....	39
3.3.4 Zwischenfazit.....	39
<b>4 Konkretisierung der Zielstellung und des Forschungsdesigns</b> .....	<b>41</b>
4.1 Motivation und Zielstellung.....	41
4.2 Forschungsdesign.....	42

<b>5</b>	<b>Querkraftanalyse - Höhe und Korrelation mit Bewertungsgrößen</b>	<b>49</b>
	<b>(Explorative Studie)</b> .....	<b>49</b>
5.1	Vorstudie .....	50
5.1.1	Fragestellungen .....	50
5.1.2	Methodisches Vorgehen .....	51
5.1.3	Ergebnisse .....	55
5.1.4	Theoretische Betrachtung der Querkraft .....	58
5.1.5	Diskussion .....	61
5.2	Hauptstudie .....	62
5.2.1	Fragestellungen .....	63
5.2.2	Methodisches Vorgehen .....	63
5.2.3	Ergebnisse .....	70
5.2.4	Diskussion .....	78
5.3	Zusammenfassung .....	83
<b>6</b>	<b>Querkräfteinfluss auf Produktivität und Vibrationen (Kausale Studie I)</b> ..	<b>85</b>
6.1	Fragestellungen .....	86
6.2	Methodisches Vorgehen .....	87
6.2.1	Versuchsaufbau .....	87
6.2.2	Versuchsablauf .....	95
6.2.3	Datenauswertung .....	96
6.3	Ergebnisse .....	100
6.4	Diskussion .....	113
6.4.1	Produktivität .....	113
6.4.2	Vibrationen .....	118
6.5	Zusammenfassung .....	123
<b>7</b>	<b>Querkräfteinfluss in Interaktion mit Bohrerverschleiß und Beton (Kausale</b>	
	<b>Studie II)</b> .....	<b>125</b>
7.1	Fragestellungen .....	126
7.2	Methodisches Vorgehen .....	127
7.2.1	Versuchsaufbau .....	127
7.2.2	Versuchsablauf .....	127
7.2.3	Datenauswertung .....	128
7.3	Ergebnisse .....	131
7.3.1	Produktivität .....	131
7.3.2	Vibration .....	133
7.3.3	Verschleiß .....	136
7.4	Diskussion .....	145
7.4.1	Produktivität .....	145
7.4.2	Vibration .....	147
7.4.3	Verschleiß .....	150

7.5	Zusammenfassung .....	152
<b>8</b>	<b>Übertragbarkeit der Prüfstandergebnisse auf das manuelle Bohren (Verifikationsstudie).....</b>	<b>157</b>
8.1	Fragestellungen .....	158
8.2	Methodisches Vorgehen .....	159
8.2.1	Versuchsaufbau .....	159
8.2.2	Probanden .....	160
8.2.3	Versuchsablauf .....	161
8.2.4	Datenauswertung .....	163
8.3	Ergebnisse der Verifikationsstudie .....	163
8.4	Diskussion der Ergebnisse der Verifikationsstudie .....	167
8.5	Theoretische Betrachtung des Kräftesystems am Prüfstand .....	170
8.6	Gesamtdiskussion der Verifikationsstudie .....	179
8.6.1	Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf das manuelle Hammerbohren .....	180
8.6.2	Anforderungsdefinition für zukünftige Prüfstände .....	182
8.7	Zusammenfassung .....	183
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>187</b>
9.1	Zusammenfassung .....	187
9.2	Ausblick .....	191
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
	<b>Glossar .....</b>	<b>XV</b>
	<b>Anhang A .....</b>	<b>XVII</b>
	Explorative Studie - Hauptstudie .....	XVII
	<b>Anhang B .....</b>	<b>XIX</b>
	Kausale Studie I - Produktivität .....	XIX
	Kausale Studie I - Vibrationen .....	XXI
	<b>Anhang C .....</b>	<b>XXXIV</b>
	Kausale Studie II .....	XXXIV
	<b>Anhang D .....</b>	<b>XXXVII</b>
	Verifikationsstudie - Bestimmung Kennwerte .....	XXXVII
	Verifikationsstudie - Bestimmung der Federsteifigkeiten .....	XXXIX
	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>XLIII</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Funktionsprinzip von elektropneumatischen Bohrhämmern .....	6
Abbildung 2.2:	Bauformen von elektropneumatischen Schlagwerken .....	7
Abbildung 2.3:	Begriffsdefinition für elektropneumatische Bohrhämmer (Riederer, 1985) .....	7
Abbildung 2.4:	Begriffsdefinition der Gestaltmerkmale eines Wendelbohrers mit vier Schneidkanten .....	8
Abbildung 3.1:	Zusammenhänge der Körperkräfte des Menschen .....	11
Abbildung 3.2:	Darstellung der unterschiedlichen Wirkrichtung der Andruck- ( $F_{pu}$ ), Vorschubkraft ( $F_f$ ), Führungskraft ( $F_g$ ) und Hebekraft ( $F_h$ ) in Abhängigkeit der Bohrhämmerorientierung .....	14
Abbildung 3.3:	Von Cronjäger et al.(1984) entwickelter Bohrprüfstand .....	16
Abbildung 3.4:	Durchführung der Verifizierung des entwickelten Hand-Arm- Modells (linkes Bild) sowie Hand-Arm-Modell mit Prüfstand (rechtes Bild) .....	17
Abbildung 3.5:	Schematische Darstellung des Hand-Arm-Modells (links) sowie eine gesamte Abbildung des Prüfstands beim Hammerbohren (rechts) .....	18
Abbildung 3.6:	Zusammenhang der Vorschubkraft und Vorschubgeschwindigkeit .....	22
Abbildung 3.7:	Von Botti et al. (2017) verwendete Parameter zur Bewertung des Verschleißes an der Bohrerspitze .....	26
Abbildung 3.8:	Experimentell ermittelte Zerspankraftfunktion von Beton und Granit .....	27
Abbildung 3.9:	Gemessene Zerspankraftfunktionen zur Beschreibung des Verhaltens einer Metallspitze in Beton .....	28
Abbildung 3.10:	Von Hecker gemessener Spannungsverlauf in einer mit DMS- Streifen ausgestatteten Stange bei der Nutzung eines Bohrhammers.....	29
Abbildung 3.11:	Zerspankraft über Eindringweg eines Bohrers über den Zeitraum von vier Wellenreflexionen (Phasen) innerhalb des Bohrers.....	30

Abbildung 3.12:	Einfluss der Betonfestigkeit auf die Vorschubgeschwindigkeit (Bohrgeschwindigkeit) in cm/min beim Hammerbohren.....	31
Abbildung 3.13:	Filterverlauf zur Bewertung der zwischen Anwender und Power-Tool gemessenen Vibrationen hinsichtlich menschlicher Schädigung.....	33
Abbildung 3.14:	Zusammenhang der Vorschubkraft und des $a_{hv}$ -Wertes .....	35
Abbildung 3.15:	Abbildung des Antriebskolbenwegs (AK), Gehäusewegs (GE) und der Gehäusebeschleunigung.....	37
Abbildung 4.1:	Forschungsdesign der vorliegenden Arbeit zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage welchen Einfluss die Querkraft auf den Hammerbohrprozess hat .....	43
Abbildung 4.2:	Darstellung der durchgeführten Studien mit zugehörigen Forschungsfragen dieser Arbeit .....	44
Abbildung 4.3:	Schematische Darstellung des Versuchsdesigns der explorativen Studie .....	45
Abbildung 4.4:	Schematische Darstellung des Versuchsdesigns der kausalen Studie I.....	46
Abbildung 4.5:	Schematische Darstellung des Versuchsdesigns der kausalen Studie II.....	47
Abbildung 4.6:	Schematische Darstellung des Versuchsdesigns der Verifikationsstudie.....	48
Abbildung 5.1:	Beschreibung des Versuchsaufbaus zur Durchführung der manuellen Versuche .....	51
Abbildung 5.2:	Beispielhafte Darstellung der von den Probanden eingenommenen Körperhaltung bei den drei Bohrrichtungen .	53
Abbildung 5.3:	Beschreibung der typischen Phasen während dem manuellen Hammerbohren anhand des Kraftverlaufes .....	55
Abbildung 5.4:	Abbildung des Querkraftvektors je Bohrrichtung und der subjektiven Vorschubkraft .....	58
Abbildung 5.5:	Kräfteysteme für das vertikal nach unten Bohren bei den beiden Zuständen Ansetzen (a) und Bohren mit der Ansicht in y-Richtung (b) bzw. in x-Richtung (c) in Abhängigkeit der Andruckkräfte (Hauptgriff: $F_{PUh}$ , Seitengriff: $F_{PUs}$ ) sowie Führungskräfte.....	59
Abbildung 5.6:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus am Beispiel des horizontalen Bohrens.....	65

Abbildung 5.7:	Exemplarische Abbildung der beiden Bohrrichtungen. Im linken Bild ist das horizontale und im rechten Bild das vertikale nach unten Bohren zu sehen. Zusätzlich ist im rechten Bild die Anzeige zur Vorgabe der Bohrrichtung sowie das visuelle Feedback der Vorschubkraft erkennbar. Diese wurde für eine übersichtlichere Darstellung im linken Bild entfernt. ....	68
Abbildung 5.8:	Gemessene Querkräfte in Abhängigkeit von der Vorschubkraft und der Bohrrichtung. ....	72
Abbildung 5.9:	Verhältnis der von den Probanden aufgebrachtene Andruckkräfte zwischen dem Hauptgriff und Seitengriff in Abhängigkeit von der Vorschubkraft und der Bohrrichtung. ....	73
Abbildung 5.10:	Ergebnisse der Vorschubgeschwindigkeit für die unterschiedlichen Vorschubkräfte (Mdn $\pm$ 25. / 50. Quantile; n. s.), Bohrer (M $\pm$ SD; #p < .05 and *p < .001 vs. D10-4-Schneider) und Bohrrichtungen (Mdn $\pm$ 25. / 50. Quantile; §p < .001) ....	75
Abbildung 5.11:	Frequenzbewertete Beschleunigung $a_{nv}$ am Hauptgriff (a) und Seitengriff (b) unterteilt in Bohrrichtung und der Vorschubkraft. ....	77
Abbildung 6.1:	Roboterbasierter Versuchsaufbau der kausalen Studien. ....	88
Abbildung 6.2:	Abbildung der Regelungsstruktur anhand der Blockdarstellung für die Vorschubrichtung (oben) und den beiden Querkräften (unten).....	90
Abbildung 6.3:	Sprungantworten der Vorschubkraft (blaue Kurven) von unterschiedlichen Gerätezuständen am roboterbasierten Prüfstand zur Verifikation der Regelung. ....	92
Abbildung 6.4:	Rohsignal der Vorschubkraft (graue durchgezogene Linie) und der Querkraft (graue gestrichelte Linie) sowie das Wegsignal (schwarz) einer Bohrung mit den Sollwerten der Vorschubkraft von 170 N (blau) und der Querkraft von 60 N (blau). ....	97
Abbildung 6.5:	Mediane der Vorschubgeschwindigkeit (ROP) über Vorschubkraft für die verschiedenen Setups, bestehend aus verschiedenen Bohrern und Bohrhämmern, inkl. Näherungslinie. ....	102
Abbildung 6.6:	Boxplots der Vorschubgeschwindigkeit für Vorschubkräfte FF = 80 – 140 N pro Querkraft zeigen einen größeren Einfluss der Querkraft bei 80 N Vorschubkraft. ....	103

Abbildung 6.7:	Mediane der ROP aufgetragen über der Querkraft für die verschiedenen Setups, bestehend aus den unterschiedlichen Bohrern und Bohrhämmern, inkl. Näherungslinie. ....	104
Abbildung 6.8:	Einfluss der Vorschubkraft auf die Schlagfrequenz für jeden Bohrhämmer. ....	106
Abbildung 6.9:	Einfluss der Vorschubkraft auf den $a_{HV}$ -Wert des Gehäuses und des Hauptgriffs für jeden Bohrhämmer und auf jeden Bohrer	108
Abbildung 6.10:	Einfluss der Querkraft auf die Schlagfrequenz für jeden Bohrhämmer. ....	110
Abbildung 6.11:	Einfluss der Querkraft auf den $a_{HV}$ -Wert des Gehäuses und des Hauptgriffs für jeden Bohrhämmer und jeden Bohrertypen....	112
Abbildung 7.1:	Schematische Darstellung der ausgewerteten Parameter an der Bohrerspitze.....	129
Abbildung 7.2:	Ausgewertete Messpunkte (1: 10 mm, 2: 60 mm, und 3: 100 mm) an der Bohrerwendel. ....	129
Abbildung 7.3:	Verlauf der Vorschubgeschwindigkeit (ROP) über kumulative Bohrmeter für jeden Beton (C), Vorschubkraft (FF) und Querkraft (LF). ....	133
Abbildung 7.4:	Verlauf der $a_{HV}$ -Werte des Hauptgriffs über kumulierte Bohrmeter für die Faktoren Beton (C), Vorschubkraft (FF) und Querkraft (LF). ....	134
Abbildung 7.5:	Verlauf der $a_{HV}$ -Werte des Gehäuses über kumulierte Bohrmeter für die Faktoren Beton (C), Vorschubkraft (FF) und Querkraft (LF). ....	135
Abbildung 7.6:	Differenz zwischen dem Ursprungsdurchmesser und dem Durchmesser der verschlissenen Wendel bei 32 Bohrern. ....	138
Abbildung 7.7:	Änderung von D47 in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit und der Hersteller. ....	141
Abbildung 7.8:	Vergrößerung des Bildes h) aus Tabelle 7.6 zur Veranschaulichung der Absplitterung entlang der Ecke zwischen Planfläche und Schneidkante.....	144
Abbildung 7.9:	Zusammenfassung der Haupterkenntnisse dieser Forschungsarbeit über den Einfluss der untersuchten Faktoren auf den $a_{HV}$ -Wert und die ROP in Form von Ursache-Wirkungs-Diagrammen .....	155
Abbildung 8.1:	Versuchsaufbau zum vertikalen nach unten Bohren mit Probanden in der Verifikationsstudie.....	160

Abbildung 8.2:	Schematische Darstellung der Belastungen bei den beiden manuellen Versuchsssetups der Verifikationsstudie. ....	162
Abbildung 8.3:	Schematische Darstellung der wirkende Kräfte am Bohrhämmer (a) sowie des Federersatzsystems in Seiten- (b) und Draufsicht (c) bestehend aus Hand-Arm-Modell und Schwingungsentkopplung des Bohrhammers in Vorschubrichtung .....	171
Abbildung 8.4:	Schematische Darstellung der wirkenden Kräfte am Bohrhämmer (a), das Federersatzsystem (b) bestehend aus Hand-Arm-Modell und Schwingungsentkopplung des Bohrhammers in Querkraftrichtung.....	176
Abbildung 8.5:	Kraftangriffspunkte am Hauptgriff zur Bestimmung der Federsteifigkeiten der Schwingungsentkopplung beider Bohrhämmer .....	178
Abbildung B.1:	Exemplarischer Einfluss der Querkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhämmergehäuses für den GBH 3-28 bei einer Vorschubkraft von 110 N .....	XXVI
Abbildung B.2:	Exemplarischer Einfluss der Querkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhämmergehäuses für den GBH 3-28 bei einer Vorschubkraft von 170 N .....	XXVII
Abbildung B.3:	Exemplarischer Einfluss der Querkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhämmergehäuses für den TE 30 bei einer Vorschubkraft von 110 N .....	XXVIII
Abbildung B.4:	Exemplarischer Einfluss der Querkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhämmergehäuses für den TE 30 bei einer Vorschubkraft von 170 N .....	XXIX
Abbildung B.5:	Exemplarischer Einfluss der Querkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhämmergehäuses für den TE 30 in Kombination mit dem Hohlbohrer bei einer Vorschubkraft von 110 N.....	XXX
Abbildung B.6:	Exemplarischer Einfluss der Vorschubkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhämmergehäuses für den GBH 3-28 in Kombination mit dem 4-Schneider bei einer Querkraft von 0 N.....	XXXI
Abbildung B.7:	Exemplarischer Einfluss der Vorschubkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhämmergehäuses für den TE30 in Kombination mit dem 4-Schneider bei einer Querkraft von 0 N.....	XXXII

Abbildung B.8:	Exemplarischer Einfluss der Vorschubkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhammergehäuses für den TE 30 in Kombination mit dem Hohlbohrer bei einer Querkraft von 0 N .....	XXXIII
Abbildung D.1:	Diagramm zur Bestimmung des Schubmoduls G .....	XXXVII
Abbildung D.2:	Diagramm zur Bestimmung des Formfaktors K .....	XXXVIII
Abbildung D.3:	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Federsteifigkeit der Hauptgriffentkopplung beider Bohrhämmer .....	XXXIX
Abbildung D.4:	Messpunkte 1 (Pos1) und 2 (Pos2) zur Bestimmung der Federsteifigkeit je Bohrhämmer.....	XL
Abbildung D.5:	Gemessene Federsteifigkeiten der beiden Bohrhämmer an den Messpunkten 1 (Pos1) und 2 (Pos2).....	XLI

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Übersicht der bekannten Hand-Arm-Modelle .....	19
Tabelle 5.1:	Alter und anatomische Daten der Probanden .....	52
Tabelle 5.2:	Deskriptive Statistik (Mdn = Median, IQA = Interquartilsabstand, Max = Maximalwert, Min = Minimalwert) der Mittelwerte je Versuche der von den drei Probanden aufgebrachten Vorschubkräfte. Hierbei werden die Faktoren Vorschubkraft sowie Bohrrichtung unterschieden (n = 90).....	56
Tabelle 5.3:	Median und Maximalwert der Querkraft je Bohrrichtung und Vorschubkraft.....	57
Tabelle 5.4:	Alter und anthropometrische Daten der Probanden.....	66
Tabelle 5.5:	Im Experiment eingestellte Faktorstufen für Bohrrichtung (zweistufig), Vorschubkraft (dreistufig) und Bohrer (dreistufig) 67	
Tabelle 5.6:	Zusammenfassung des Ergebnisses der gemessenen Querkräfte .....	71
Tabelle 5.7:	Ergebnis der partiellen Korrelationsanalyse zwischen der Querkraft und den abhängigen Variablen ROP, $a_{hv}$ -Werte am Hauptgriff und Gehäuse sowie der Schlagfrequenz. Der gemessene Median der Vorschubkraft wurde als Kontrollvariable angegeben. ....	74
Tabelle 6.1:	Parameterwahl zur Durchführung der Regelungscharakterisierung .....	91
Tabelle 6.2:	Kennwerte der Sprungantwort zur Verifikation der Regelung des roboterbasierten Prüfstandes für die drei betrachteten Zustände (ZS) .....	93
Tabelle 6.3:	Deskriptive Statistik der auf dem Prüfstand gemessenen Quer- und Vorschubkraft mit Sollwert (SW), Mittelwert des Istwerts (IW), Standardabweichung bzw. Wiederholgenauigkeit (WG), Absolutgenauigkeit (AG) und Stichprobenanzahl (n) .....	94
Tabelle 6.4:	Faktorstufen der unabhängigen Variablen für die kausale Studie I .....	96
Tabelle 6.5:	Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests und der Bonferroni-korrigierter Post-Hoc-Tests der Querkraft (LF) auf die z-transformierte Vorschubgeschwindigkeit über alle Versuchsdurchläufe. ....	105

Tabelle 7.1:	Faktorstufen der unabhängigen Variablen für die kausale Studie II .....	128
Tabelle 7.2:	Notation der untersuchten Verschleißgrößen.....	130
Tabelle 7.3:	Ergebnis der multifaktoriellen ANOVA zur Analyse der Einflussfaktoren (C = Beton, ToM = Hersteller, FF = Vorschubkraft, LF = Querkraft, CDM = kumulative Bohrmeter) auf die ROP (n = 4800).....	132
Tabelle 7.4:	Exemplarischer Verschleiß an der Wendel des Bohrers 10 mm hinter der Bohrspitze (Messpunkt 1) für beide Hersteller. (Übersetzt von Uhl et al., 2020, under Review im International Journal of Industrial Ergonomics).....	139
Tabelle 7.5:	Exemplarische Bilder der Bohrspitzen im Grundzustand, nach 10.5 kumulierten Bohrmeter und nach 21 kumulierten Bohrmeter beider Hersteller in Beton C 50/60 gebohrt. (Übersetzt von Uhl et al., 2020, under Review im International Journal of Industrial Ergonomics).....	142
Tabelle 7.6:	Exemplarische Bilder der Bohrspitzen im Grundzustand, nach 10.5 kumulierten Bohrmeter und nach 21 kumulierten Bohrmeter beider Hersteller in Beton C 50/60 gebohrt. Übersetzt von Uhl et al., 2020, under Review im International Journal of Industrial Ergonomics).....	143
Tabelle 7.7:	Exemplarischer Verschleiß am Außendurchmesser der Bohrspitze. Übersetzt von Uhl et al., 2020, under Review im International Journal of Industrial Ergonomics).....	145
Tabelle 8.1:	Alter und anthropometrische Daten der Probanden.....	161
Tabelle 8.2:	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Vorschubgeschwindigkeit (ROP) und der Schlagfrequenz ( $f_s$ ) der durchgeführten Studien zur Verifikation der mittels des Prüfstands gewonnenen Erkenntnisse.....	165
Tabelle 8.3:	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Bohrhammervibrationen am Hauptgriff (ahv H), Gehäuse (ahv G) und Seitengriff (ahv S) der durchgeführten Studien zur Verifikation der mittels des Prüfstands gewonnenen Erkenntnisse.....	166
Tabelle 8.4:	Eigenschaften der relevanten Parameter des Hand-Arm-Modells zur Bestimmung der Ersatzfedersteifigkeiten .....	174
Tabelle 8.5:	Berechnungsergebnisse der Ersatzfedersteifigkeiten zwischen unterer und oberer Anbindung für die Vorschub- und Querrichtung. Zusätzlich ist das aus den	

	Ersatzfedersteifigkeiten abgeleitete Kraftverhältnis für die Querrichtung angegeben. ....	177
Tabelle 8.6:	Ermittelte Kraftverhältnisse zwischen unterer ( $F_u$ ) und oberen ( $F_o$ ) Anbindung des Hand-Arm-odells für unterschiedliche Vorschubkräfte (VK). Die Analyse wurde für beide Bohrhämmer sowie zwei Angriffspunkten der oberen Einspannung durchgeführt. ....	178
Tabelle A.1:	Einfluss der Vorschubkraft auf den $a_{hv}$ -Wert am Haupt- und Seitengriff für beide Bohrrichtungen auf Basis des Kruskal-Wallis-Tests mit anschließendem Dunn Bonferroni Post-hoc-Test .....	XVIII
Tabelle A.2:	Mann-Whitney-U-Test zur Analyse des Einflusses der Körperhaltung auf den $a_{hv}$ -Wert am Hauptgriff und Seitengriff für drei vorgegebenen Vorschubkräfte.....	XVIII
Tabelle B.1:	Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests und Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Tests der Vorschubkraft (FF) auf die z-transformierte Vorschubgeschwindigkeit. ....	XX
Tabelle B.2:	Analyse des Einflusses der Vorschubkraft auf den $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse und am Hauptgriff der TE 30 für jeden Bohrertyp (Ho2c = Hohlbohrer, He4c = Wendelbohrer mit 4 Schneiden und He2c = Wendelbohrer mit 2 Schneiden).....	XXII
Tabelle B.3:	Analyse des Einflusses der Vorschubkraft auf den $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse und am Hauptgriff der GBH 3-28 für jeden Bohrertyp (Ho2c = Hohlbohrer, He4c = Wendelbohrer mit 4 Schneiden und He2c = Wendelbohrer mit 2 Schneiden).....	XXIII
Tabelle B.4:	Analyse des Einflusses der Querkraft auf den $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse und am Hauptgriff des TE 30 für jeden Bohrertyp (Ho2c = Hohlbohrer, He4c = Wendelbohrer mit 4 Schneiden und He2c = Wendelbohrer mit 2 Schneiden).....	XXIV
Tabelle B.5:	Analyse des Einflusses der Querkraft auf den $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse und am Hauptgriff des GBH 3-28 für jeden Bohrertyp (Ho2c = Hohlbohrer, He4c = Wendelbohrer mit 4 Schneiden und He2c = Wendelbohrer mit 2 Schneiden).....	XXV
Tabelle C.1:	Ergebnis des Friedman-Tests zur Analyse der Einflussfaktoren auf den Verschleiß der Bohrerspitze. $n = 32$ . ....	XXXV
Tabelle C.2:	Ergebnis der multifaktoriellen ANOVA zur Analyse der Einflussfaktoren (kumulierte Bohrmeter (CDM), Hersteller (ToM), Betonfestigkeit (C), Vorschubkraft (FF) und Querkraft	

(LF) auf die  $a_{HV}$ -Werte des Hauptgriffs und des Gehäuses. n =  
4800 ..... XXXVI

# Abkürzungsverzeichnis

AC	Winkel zwischen den Schneidkanten des Bohrkopfs
AN	Winkel zwischen den Flanken der Bohrerspitze des Bohrkopfs
ANOVA	Varianzanalyse (englisch analysis of variance)
B	Schlag durch Gehäuse auf Zwischenkolben (B-Schlag)
C	Beton
CDM	Kumulierte Bohrmeter (englisch cumulative drilling meters)
D05	Durchmesser des Bohrkopfs bei 0.5 mm
D35	Durchmesser des Bohrkopfs bei 3.5 mm
D47	Durchmesser des Bohrkopfs bei 4.7 mm
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	Statistische Versuchsplanung (englisch Design of Experiments)
EN	Europäische Norm
H	Höhe des Bohrkopfs
HAM	Hand-Arm-Modell (Ersatzsystem)
He2c	Wendelbohrer mit zwei Schneidkanten
He4c	Wendelbohrer mit vier Schneidkanten
Ho2c	Hohlbohrer mit zwei Schneidkanten
IPEK	Institut für Produktentwicklung
IQA	Interquartilsabstand
ISO	Internationale Organisation für Normung

M	Mittelwert
Mdn	Median
n. s.	nicht signifikant
LF	Querkraft
ROP	Vorschubgeschwindigkeit (englisch rate of penetration)
SD	Standardabweichung
SA	Schlag durch Luftfeder
ToM	Hersteller
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
FF	Vorschubkraft
ZK	Schlag durch Zwischenkolben

# Formelverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
$A_g$	Gebundene Druckfläche	mm <sup>2</sup>
$a_{hv}$	Frequenzbewerteter Schwingungsexpositionswert	m/s <sup>2</sup>
$d_E$	Durchmesser eines zylindrischen Elastomers	mm
$d_{Ed}$	Federkonstante Elastomere (Druckbeanspruchung)	N/mm
$d_{ES}$	Federkonstante Elastomere (Schubbeanspruchung)	N/mm
$d_{FS}$	Federkonstante Federn HAM	N/mm
$D_i$	Federkonstante Federpakete i	N/mm
$D_{mit}$	Ersatzsteifigkeit mit Schwingungsentkopplung	N/mm
$D_{ohne}$	Ersatzsteifigkeit ohne Schwingungsentkopplung	N/mm
$E_r$	Rechnerisches E-Modul	N/mm <sup>2</sup>
$F_{AKh}$	Andruckkraft am Hauptgriff	N
$F_{AKs}$	Andruckkraft am Seitengriff	N
$F_G$	Gewichtskraft des Bohrhammers	N
$F_{LFhx}$	Anteil der Querkraft in x-Richtung am Hauptgriff	N
$F_{LFhy}$	Anteil der Querkraft in y-Richtung am Hauptgriff	N
$F_{LFsx}$	Anteil der Querkraft in x-Richtung am Seitengriff	N
$F_{LFsy}$	Anteil der Querkraft in y-Richtung am Seitengriff	N
$F_{LFx}$	Anteil der Querkraft in x-Richtung	N
$F_{Lx}$	Kraft in x-Richtung im Punkt L	N
$F_{Lxo}$	Kraft in x-Richtung im Punkt L am Bohrlochrand	N
$F_{Lxu}$	Kraft in x-Richtung im Punkt L am Bohrlochgrund	N
$F_{Ly}$	Kraft in y-Richtung im Punkt L	N

$F_{Lz}$	Kraft in z-Richtung im Punkt L	N
$G$	Schubmodul	N/mm <sup>2</sup>
$h_E$	Höhe eines zylindrischen Elastomers	mm
$K$	Formfaktor	-
$K_f$	Formkennwert	-
$l_1, l_2$	Abstand der Punkte 1 und 2 zum Bohrlochrand	mm
$l_{LFhx}$	Abstand Hauptgriff zum Bohrlochrand	mm
$l_{LFhy}$	Abstand Hauptgriff zum Bohrlochrand	mm
$l_{LFsx}$	Abstand Seitengriff zum Bohrlochrand	mm
$l_{LFsy}$	Abstand Seitengriff zum Bohrlochrand	mm
$M_{Lx}$	Moment um x-Achse am Punkt L	Nm
$M_{Ly}$	Moment um y-Achse am Punkt L	Nm
$n$	Anzahl	-
$\pi$	Zahl Pi	-
$ROP$	Vorschubgeschwindigkeit	N/mm
$s_1, s_2$	Auslenkung des HAM an den Punkten 1 und 2	mm
$s_{Ende}$	Ende des Bohrwegs	mm
$s_{Start}$	Start des Bohrwegs	mm
$t_{Ende}$	Ende der Bohrzeit	s
$t_{Start}$	Start der Bohrzeit	s

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Fokus der Arbeit

Um sich gegen Wettbewerber durchzusetzen, müssen Produkte optimal auf den späteren Benutzer abgestimmt sein. Die frühzeitige Einbindung von Nutzern und die Erhebung seiner Bedürfnisse werden deshalb in der Produktentwicklung immer relevanter. Die nutzerzentrierte Produktentwicklung gewinnt daher stets an Bedeutung. Neben einer hohen Gebrauchstauglichkeit steht hierbei die Produktergonomie im Fokus (DIN EN ISO 9241-11). Insbesondere in der Ergonomie wird das Ziel verfolgt, „das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren“ (DIN EN ISO 9241-210, S. 6). Eine Optimierung der Produktergonomie kann nur erreicht werden, wenn das Produkt mit seinen Eigenschaften auf den Nutzer abgestimmt wird. Hierbei gilt es, die Faktoren zu identifizieren, welche einen wesentlichen Einfluss auf für die Ergonomie relevanten Kriterien haben. In diesem Kontext sind in der Nutzung von Bohrhämmern neben dem Design der Berührflächen die Arbeitsproduktivität und die Belastung des Anwenders wichtige Bewertungskriterien. Neben dem wirtschaftlichen Aspekt hilft eine hohe Arbeitsproduktivität, die Expositionsdauer durch Vibrationen zu verringern. Zusätzlich wird einer Ermüdung des Anwenders vorgebeugt (Rohmert, 1960b), da sich die Dauer der aufzubringenden Kräfte verkürzt, welche für das Halten des Bohrhammers notwendig sind, und ihn zugleich in einen optimalen Betriebsbereich bringen. Neben Staub und Lärm führen Vibrationen zu einer starken Belastung des Anwenders. Studien haben gezeigt, dass es beim Arbeiten mit einem Bohrhämmer durch eine länger andauernde Vibrationsexposition, zu Erkrankungen kommen kann (Fridén, 2001; Pang & Goldsmith, 1992; Poole et al., 2019). Dies führte in den letzten Jahrzehnten vermehrt zu Bemühungen, die Einflussgrößen auf die Anwenderbelastung besser zu verstehen (Cronjäger & Jahn, 1985; Matthiesen, Mangold & Bruchmueller, 2018), die zulässige Expositionsdauer durch Normen zu beschränken (DIN EN ISO 28927-10) und die Expositionsbelastung durch konstruktive Maßnahmen zu reduzieren (Gillmeister, 1998; Hecker & Riederer, 1985; Oddo, Loyau, Boileau & Champoux, 2004). Durch die starke physische Interaktion zwischen Anwender und dem technischen System beeinflusst der Anwender den Hammerbohrprozess. Insbesondere die Andruckkraft des Anwenders hat einen großen Einfluss auf die genannten Bewertungskriterien Gehäusevibration und Arbeitsproduktivität (Botti et al., 2020; Cronjäger & Jahn, 1985). Um die Ergonomie eines Bohrhammers gezielt zu optimieren, steht der Entwickler vor der Herausforderung, alle relevanten Einflussfaktoren kennen zu

müssen. Untersuchungen haben ergeben, dass Anwender bei der Nutzung von Bohrhämmern, neben der Andruckkraft, Querbewegungen aufbringen (Momeni, Moseley, Ante & Allaart, 2017) und dass eine Querstellung des Bohrers den Hammerbohrprozess beeinflussen kann (Cronjäger, Jahn & Riederer, 1984). Bislang fehlt jedoch das Wissen in welcher Größenordnung Querkkräfte beim Prozess des Hammerbohrens auftreten und inwieweit sie diesen beeinflussen. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit das Ziel verfolgt, die Entstehung von Querkkräften zu analysieren und deren Zusammenhang mit den Bewertungskriterien Gehäusevibration und Arbeitsproduktivität zu erforschen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können zukünftig Maßnahmen in der Gestaltung des Produktes erarbeitet werden, um die Anwenderbelastung zu senken, beziehungsweise die Arbeitsproduktivität zu erhöhen und dadurch die Ergonomie von Bohrhämmern zu verbessern. Ein weiterer Anwendungsaspekt der Ergebnisse ist im Bereich der Normung zu sehen. In den Normen zur Bewertung der Anwenderbelastung durch Vibrationen können in Zukunft die Einflüsse von Querkkräften berücksichtigt werden. Dies erlaubt es Bohrhämmer besser miteinander zu vergleichen und realitätsnähere Testfälle abzuleiten. Auch in der Produktentwicklung kann das Wissen eine direkte Anwendung finden. Die aktuelle Gestalt der Schwingungsentkopplungen von Bohrhämmern sind primär für das Aufbringen von Andruckkräften ausgelegt. Die in dieser Arbeit durchgeführten Studien helfen Entwicklungspotentiale der aktuellen Bohrhämmerdesigns aufzudecken. Weiterhin helfen die Erkenntnisse über den Einfluss der Querkraft auf die untersuchten Bewertungskriterien bei der Abbildung eines realistischeren Anwenderverhaltens in Simulations- und Testumgebungen. Hierdurch werden falsche Entscheidungen aufgrund von Modellierungsfehlern in der Produktentwicklung verhindert und somit das finanzielle Risiko verringert.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. Nach der Einleitung werden im zweiten Kapitel relevante Grundlagen und in Kapitel 3 der Stand der Forschung dargestellt. Es werden zunächst die beim Hammerbohren auftretenden Anwenderkräfte beschrieben und wie diese bislang in Prüfständen berücksichtigt werden. In den beiden darauffolgenden Unterkapiteln werden bekannte Einflussgrößen auf die Produktivität sowie auf die Belastung des Anwenders durch Vibrationen beim Hammerbohren erläutert.

In Kapitel 4 wird, ausgehend vom Stand der Forschung, das Thema dieser Arbeit beschrieben und das Ziel der Arbeit bzw. die übergeordnete Forschungsfrage abgeleitet. Anschließend wird diese in einzelne Forschungsfragen aufgegliedert.

Anhand des Forschungsdesigns werden aufeinander aufbauende Experimente beschrieben, um die einzelnen Forschungsfragen zu beantworten.

Die Kapitel 5 bis 8 beinhalten jeweils die Beschreibung der vier durchgeführten Studien und die daraus gewonnen Ergebnisse. Zusätzlich wird am Ende des jeweiligen Kapitels eine Diskussion der Einzelergebnisse durchgeführt, um daraus wichtige Erkenntnisse abzuleiten und die Auswirkungen auf die darauffolgenden Studien darlegen zu können. In Kapitel 5 wird eine Studie mit manuellem Hammerbohren beschrieben, welche zur Abschätzung der Höhe der auftretenden Querkräfte dient.

Die beiden Studien in Kapitel 6 und 7 dienen zur Analyse des Zusammenhanges zwischen der Querkraft des Anwenders und der Produktivität bzw. Belastung des Anwenders durch Vibrationen. Während in dem Kapitel 6 der Schwerpunkt auf mehreren Faktorstufen der Querkraft liegt, wird der Fokus in Kapitel 7 auf die Interaktion der Querkraft mit unterschiedlichen Betonfestigkeiten und dem Bohrerverschleiß gelegt. In beiden Untersuchungen wird der Faktor Vorschubkraft ebenfalls berücksichtigt. In Kapitel 8 wird ein Experiment mit manuellem Hammerbohren beschrieben, welches zur Verifikation der Ergebnisse auf dem Prüfstand dient.

Im abschließenden Kapitel 9 werden die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und mögliche zukünftige Forschungsaktivitäten aufgezeigt.



## **2 Grundlagen**

Im Umfeld von Bohrhämmern werden unterschiedliche Begriffe für die Komponenten eines Bohrhammers verwendet. Aufgrund dessen wird in diesem Kapitel für ein einheitliches Verständnis der Hammerbohrprozess, die relevanten Begrifflichkeiten sowie die technischen Systeme Bohrhammer und Bohrer beschrieben.

### **2.1 Hammerbohrprozess**

Bohrhämmer sind handgehaltene Maschinen die unter anderem im Bergbau, Bauwesen und Brückenbau zur Bearbeitung von mineralischen Strukturen, wie beispielsweise Beton, eingesetzt werden. Das Verfahren Hammerbohren gehört zu den trennenden Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide. Um ein zylindrisches Bohrloch zu erzeugen, erzeugt der Bohrhammer eine rotatorische Bewegung des Bohrers, die mit einem translatorischen Schlag überlagert wird. Hierdurch schlägt der Bohrer kleine Teile aus dem Beton heraus. Die herausgebrochenen Teile werden Bohrklein genannt. Durch weitere Schläge werden einerseits mehr Bohrklein aus dem Beton geschlagen und andererseits das Bohrklein weiter zertrümmert. Hieraus entsteht feineres Bohrmehl, welches von dem Bohrer aus dem Bohrloch herausbefördert wird. Die Rotationsbewegung des Bohrers führt dazu, dass die Schneide des Bohrkopfs nicht in die vorher erzeugte Kerbe erneut hineinschlägt. Der Versetzungswinkel ist dabei so gewählt, dass die Schneide nach etwa einer Umdrehung des Bohrers um ca. 8 - 10° zur ursprünglichen Position gedreht aufsetzt. Dadurch kann in Kombination mit einem geeigneten Kerbwinkel (Vonnemann, 1977) möglichst große Bruckstücke erzeugt werden.

### **2.2 Das System Bohrhammer**

Die Kernelemente eines Bohrhammers sind der Antriebsstrang inklusive dem Schlagwerk. Typischerweise werden Bohrhämmer pneumatisch oder elektrisch angetrieben. In der Abbildung 2.1 ist das Funktionsprinzip von elektrisch angetriebenen Bohrhämmern abgebildet. Die Motoranordnung bei elektrisch angetriebenen Bohrhämmern kann zum Schlagwerk in Reihe oder in Winkelbauform

aufgebaut sein. Dies beeinflusst die Wahl des Getriebes. Nach dem Getriebe wird die rotationsbewegung einerseits über den Drehantrieb inklusive Sicherheitskupplung an den Werkzeughalter übertragen und andererseits in eine translatorische Bewegung anhand des Rotations-Translationswandler überführt.

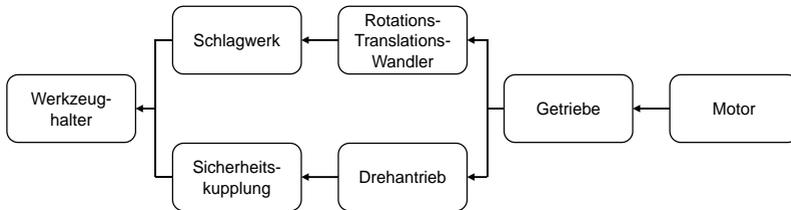


Abbildung 2.1: Funktionsprinzip von elektropneumatischen Bohrhämmern

Der Rotations-Translations-Wandler wird zumeist als Exzenterantrieb oder Taumeltrieb realisiert. Wie bei den anderen Baugruppen gibt es bei den Schlagwerken ebenso unterschiedliche Varianten. Neben dem Massenschlagwerk hat sich insbesondere das elektropneumatische Schlagwerk durchgesetzt. Da lediglich dieses in der vorliegenden Arbeit Verwendung fand, wird nur darauf genauer eingegangen. In Abbildung 2.2 sind Bauformen von Luftfederschlagwerken dargestellt. Die Bohrhämmer dieser Arbeit besitzen die Bauformen (b) und (d). Die relevanten Komponenten eines Schlagwerkes sind der Antriebskolben, der Schlagkolben und der Zwischenkolben (siehe 125), da diese für die Energieübertragung zuständig sind. Um den erzeugten Impuls optimal auf den Bohrer übertragen zu können, müssen die Schlagkomponenten genau aufeinander abgestimmt werden. Neben der Gestalt betrifft dies insbesondere das Gewicht der Komponenten.

Aufgrund von Normen (DIN EN ISO 28927-10) und von den Herstellern gemeinsam definierte Richtlinien (EPTA-European Power Tool Association, 2009) müssen Hersteller bohrhammerspezifische Kenngrößen angeben. Hierunter zählen der  $a_{HV}$ -Wert zur Beschreibung der vom Bohrhämmer auf den Anwender wirkenden schädlichen Vibrationen und die Einzelschlagenergie des Bohrhammers. Um einen möglichst niedrigen Vibrationswert aufweisen zu können, wurden konstruktive schwingungsreduzierende Maßnahmen (Gillmeister, 1998) erforscht. Eine Maßnahme, welche sich hauptsächlich durchgesetzt hat, ist die

Schwingungsentkopplung des Hauptgriffs. In der Abbildung 2.3 ist ein elektropneumatischer Bohrhammer mit der Begriffsdefinition der relevanten Einzelkomponenten dargestellt.

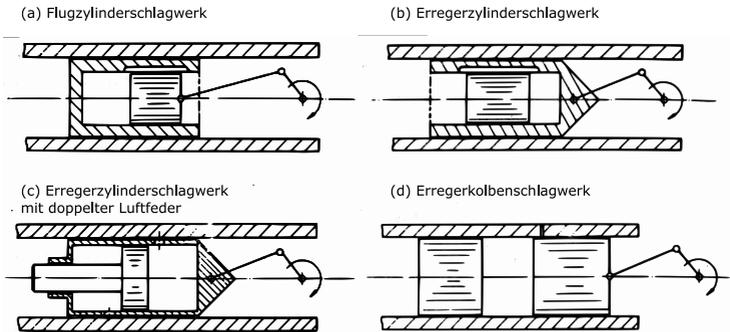


Abbildung 2.2: Bauformen von elektropneumatischen Schlagwerken (Riederer, 1985)

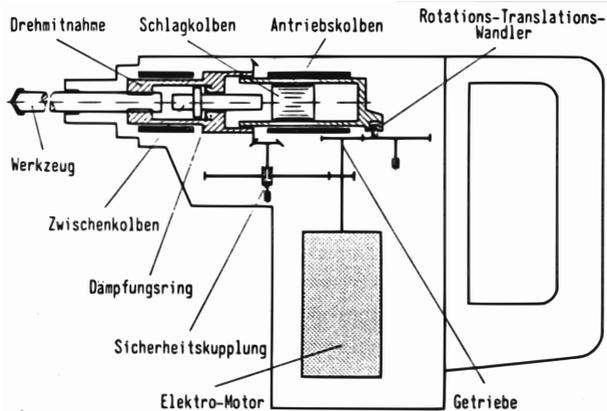


Abbildung 2.3: Begriffsdefinition für elektropneumatische Bohrhammer (Riederer, 1985)

### 2.3 Das System Hammerbohrer

Hammerbohrer sind nach der Deutsches Institut für Bautechnik „Bohrer mit verschleißfestem Schneidkörper aus Hartmetall und mit Systemeinsteckenden zur Aufnahme in Bohrhämmer mit elektropneumatischen oder Federkulissenschlagwerken.“ (MauerbohrerMBI:2002-01 (Bekanntmachung), S. 2) Wie eingangs erwähnt hat der Bohrer die Hauptaufgabe den vom Bohrhämmer erzeugten Schlag auf den Beton zu übertragen. Eine weitere Funktion des Bohrers ist das entfernen des Bohrmehls aus dem Bohrloch. Um diese Funktion zu realisieren, gibt es hauptsächlich zwei Ansätze. Wendelbohrer (Hecker & Riederer, 1985) nutzen die Rotationsbewegung des Bohrers, um das Bohrmehl mit Hilfe der Wendelgänge entsprechend einem Schraubenförderer herauszuschieben. Hierbei ist es entscheidend, dass Volumen der Wendelgänge groß genug ist und eine darauf angepasste Drehzahl des Bohrers vorliegt. Insbesondere bei Hammerbohrern mit kleinem Durchmesser wird deshalb eine hohe Drehzahl benötigt. Der zweite Ansatz zum entfernen des Bohrmehls wird anhand von Hohl- bzw. Saugbohrern (Hecker & Riederer, 1985) realisiert. Der Bohrer besitzt statt der Wendelgänge einen zylindrischen Schaft mit einer Kernbohrung. Anhand dieser Bohrung, welche am Bohrerkopf endet kann in Kombination mit einem Industriestaubsauger das Bohrmehl durch Unterdruck über die Bohrung im Bohrer aus dem Bohrloch entfernt werden. Neben diesen beiden Ansätzen unterscheiden sich Bohrer insbesondere durch das verwendete Material, den Durchmesser, die Schneidenanzahl sowie das Herstellungsverfahren. Für ein besseres Verständnis sind in Abbildung 2.4 die Begrifflichkeiten für die in dieser Arbeit relevanten Gestaltmerkmale von Bohrern definiert.

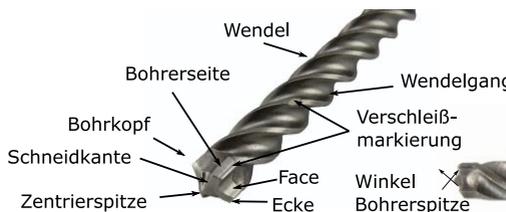


Abbildung 2.4: Begriffsdefinition der Gestaltmerkmale eines Wendelbohrers mit vier Schneidkanten

### 3 Stand der Forschung

Bei der Nutzung von Bohrhämmern treten zwischen dem technischen System und dem Anwender starke mechanische Wechselwirkungen auf (Bruchmüller, 2019; Mangold, 2019). Einerseits werden durch die Schwingungseigenschaften und die aufgebrachten Kräfte des Anwenders die vom Gerät auf den Menschen übertragenen Vibrationen (Anton et al., 2010; Blache, Desmoulin, Allard, Plamondon & Begon, 2015; Bovenzi, 1994; Poole et al., 2019) beeinflusst. Andererseits bewirken die Anwenderkräfte eine Veränderung der Zustände des Bohrerantriebsstrangs (Jahn, 1985). Für ein grundlegendes Verständnis wie die Anwenderkräfte entstehen, werden in dem Kapitel 3.1 zunächst die Körperkräfte des Menschen beschrieben und von welchen Parametern diese abhängen. Anschließend wird erläutert, welche Anwenderkräfte im Umgang mit Power-Tools und insbesondere mit Bohrhämmern auftreten und wie diese Kräfte im Stand der Forschung auf Prüfständen abgebildet werden.

In der Produktentwicklung ist die Produktivität des zu entwickelnden Produktes eine wichtige Entwicklungszielgröße. Die Produktivität kann dabei unter Berücksichtigung unterschiedlicher Zeiträume analysiert werden. Im Kontext des Hammerbohrens kann eine kurzfristige Betrachtung, also je einzelner Bohrung, (Botti et al., 2020; Cronjäger & Jahn, 1985; Rempel, Antonucci et al., 2019), über mehrere Stunden unter Berücksichtigung der menschlichen Ermüdung (Anton et al., 2010; Rohmert, 1960a, 1960b) oder über Jahre hinweg stattfinden. Bei der Analyse der Produktivität über Jahre spielen insbesondere mögliche Folgeerkrankungen des Menschen aufgrund der Arbeitstätigkeit eine Rolle. Nach dem derzeitigen Stand der Forschung ist bekannt, dass neben Lärm und Staub insbesondere die vom Bohrergehäuse auf den Anwender übertragenen Schwingungen bleibende Schäden (Bovenzi, 1994; Poole et al., 2019) bei diesem erzeugen. Bislang gibt es diverse Studien, anhand derer die Einflussfaktoren auf die Produktivität sowie die Vibrationsexposition beim Hammerbohren untersucht wurden. Um die Einflüsse der Faktoren zu beschreiben, kann im Sinne des XiL-Ansatzes (Matthiesen, Behrendt, Gwosch, Bruchmueller & Schaefer, 2018) das Gesamtsystem in Anwender, technisches System bestehend aus Bohrer und Bohrer, Umwelt sowie der Anwendung aufgeteilt werden. Neben den Haupteffekten eines Faktors können auch Interaktionen mit den anderen Teilsystemen auftreten. Deshalb werden in den folgenden Kapiteln die Einflüsse aller Teilsysteme beschrieben. Im Unterkapitel 3.2 werden die Einflüsse der einzelnen Teilsysteme auf die Produktivität und

abschließend in 3.3 die Einflüsse der Teilsysteme auf die Gehäusevibrationen dargestellt.

## **3.1 Definition und Abbildung der Anwenderkräfte**

Power-Tools umfassen handgehaltene und handgeführte Maschinen, bei denen der Mensch im Leistungsfluss (Fraser, 1980; Matthiesen, Mangold, Bruchmüller & Marko, 2014) steht. Der Anwender muss bei der Nutzung von Power-Tools Kräfte aufbringen, damit diese Arbeit verrichten können (Vonnemann, 1977). In den folgenden Unterkapiteln wird deshalb zunächst beschrieben, welche Anwenderkräfte auftreten und wodurch diese beeinflusst werden. Im Anschluss wird beschrieben wie diese Anwenderkräfte im Umfeld von Power-Tools bezeichnet und in Versuchsumgebungen für Bohrhämmer von wissenschaftlichen Studien abgebildet werden.

### **3.1.1 Definition der Körperkräfte des Menschen**

Durch das aufrechte Stehen und bei Bewegungen wirken sowohl im Menschen als auch nach außen hin Kräfte. In der DIN 33411-1 (DIN 33411-1) werden die sogenannten Körperkräfte des Menschen definiert. Diese Kräfte treten im Zusammenhang mit dem Körper des Menschen auf und können „beim Einhalten von Körperstellungen, bei Durchführung freier und geführter Bewegungen des Körpers und seiner Gliedmaßen“ (DIN 33411-1) auftreten. In der DIN 33411-1 werden diese weiter in drei Untergruppen unterteilt (siehe Abbildung 3.1). Die Muskelkraft bezieht sich auf alle Kräfte, welche innerhalb des Körpers wirken. Wirkt auf die Masse des Körpers eine Trägheitskraft, wird dies als Massenkraft bezeichnet. Eine derartige Kraft tritt beispielsweise auf, wenn der gesamte Körper oder Teile des Menschen durch eine externe Kraft beschleunigt wird. Die Muskel- und Massenkraft wirken per Definition nur innerhalb des Körpers. Sobald sich daraus eine resultierende Wirkung bezüglich des Körpersystems nach außen ergibt, werden diese Kräfte als Aktionskräfte bezeichnet. Die Aktionskräfte können durch unterschiedliche Körperteile an die Umwelt abgegeben werden und werden, wie die anderen beiden Körperkräfte, weiter in statische und dynamische Anteile untergliedert.

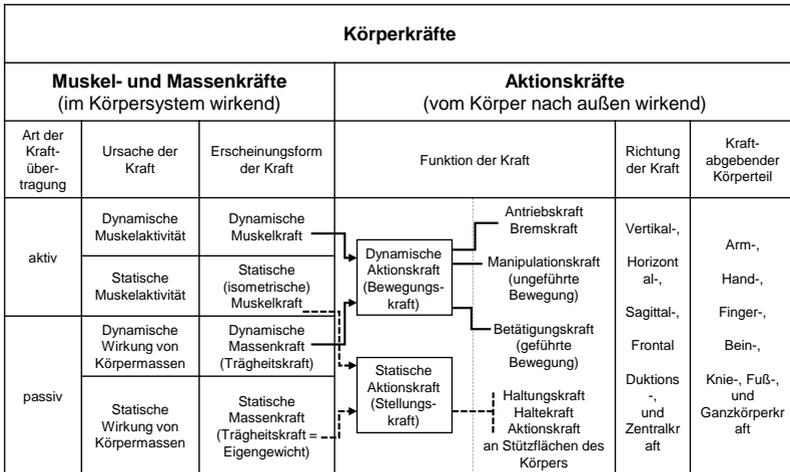


Abbildung 3.1: Zusammenhänge der Körperkräfte des Menschen (angelehnt an DIN 33411-1)

Die bereits beschriebenen Muskel- und Massenkkräfte hängen stark mit dem individuellen Trainingszustand sowie der Konstitution des Menschen zusammen. Dies führt dazu, dass sich die dynamischen und statischen Aktionskräfte von verschiedenen Arbeitern während der Ausführung derselben Tätigkeit deutlich unterscheiden können. Aufgrund dessen wurden Experimente durchgeführt, um die maximalen Aktionskräfte des Menschen zu vermessen. Hierbei wurden diverse Faktoren wie beispielsweise Körperhaltung und Einhand- oder Zweihandbetriebs analysiert. Die durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass die maximal vom Menschen aufzubringende Kraft unter anderem von der Haltung, der Richtung der Kraft, dem biologischen Geschlecht des Anwenders und seinem Alter abhängt (Schaub et al., 2015; Wakula, Berg, Schaub & Bruder, 2009). Die Kenntnis über den genauen Einfluss des jeweiligen Parameters erlaubt eine Abschätzung, ob eine bestimmte Tätigkeit von unterschiedlichen Personengruppen durchgeführt werden kann. Die gewonnenen Ergebnisse sind im Kraftatlas (Wakula et al., 2009) in umfangreicher Form, sowie reduziert in der DIN 33411 (DIN 33411-1), festgehalten.

Neben den von Wakula et al. (2009) und Schaub et al. (2015) untersuchten Einflussgrößen wurde in dem Kontext der Arbeitsbelastung des Menschen die

muskuläre Ermüdung des Menschen erforscht. Nach Mital et al. (Mital, Bishu & Manjunath, 1991) gibt es drei übergeordnete Einflussgrößen auf die Ermüdung: die physiologische, die psychologische und die Umwelteinflüsse wie z. B. der Umgebungslärm. Bei der körperlichen Ermüdung durch statische Belastungen haben sowohl die Belastungsphase (Rohmert, 1960b) als auch die Erholungsphase (Rohmert, 1960a, 1973a, 1973b) einen Einfluss. In der Entwicklung von Bohrhämmern sind somit die anwender- und anwendungsspezifischen Maximalkräfte zu berücksichtigen, jedoch auch wie lange eine Tätigkeit und somit die notwendige Kraft aufrechterhalten werden muss. Bezogen auf die Durchführung von manuellen Versuchen hilft das Wissen über die genannten Faktoren, damit bewertet werden kann, ob ausgewählte Probanden in einen Bereich der Ermüdung kommen könnten.

### **3.1.2 Definition der Power-Tool-spezifischen Anwenderkräfte**

Damit ein Power-Tool die vorgesehene Arbeit verrichten kann, muss der Mensch dieses halten bzw. führen und dabei Kräfte aufbringen. Bei dieser Interaktion mit dem Gerät bringt der Anwender sowohl statische als auch dynamische Aktionskräfte auf das Power-Tool auf. Im Stand der Forschung wird von passiven Anwendereigenschaften (Mangold, 2019) bzw. von biodynamischen Eigenschaften (ISO 10068) des Menschen gesprochen. Die durch diese Eigenschaften hervorgerufenen Kräfte sind mit den dynamischen Aktionskräften aus der DIN 33411-1 (DIN 33411-1) gleichzusetzen, welche aufgrund der dynamischen Massenkräfte entstehen. Da der Mensch nicht nur aus einer starren Masse besteht, sondern aus unterschiedlichen Strukturen wie Muskeln, Knochen, Haut, etc., werden im Stand der Forschung nicht nur Masse-, sondern auch Dämpfer- und Federeigenschaften des Menschen (Matthiesen, Mangold, Germann, Schäfer & Schmidt, 2018; ISO 10068) beschrieben. Die dynamischen Massen-Feder-Dämpfer-Eigenschaften des Menschen werden meist in Form der mechanischen Impedanz dargestellt (Besa, Valero, Suñer & Carballeira, 2007; Concettoni & Griffin, 2009; ISO 10068; Tarabini, Saggin, Scaccabarozzi & Moschioni, 2013). Diese komplexe Größe beschreibt den frequenzabhängigen Widerstand des gesamten Körpers oder des Hand-Arm-Systems des Menschen gegenüber einer Anregung. Gemessen wird dabei die Kraft und Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung zwischen dem Gerätegriff und der Hand des Anwenders. Die Impedanz des Menschen oder seines Hand-Arm-Systems sind durch ihn nicht direkt beeinflussbar. Erst durch das Anspannen von Muskeln und somit durch die aktiven Kräfte können die Eigenschaften der dynamischen Massenkräfte verändert werden. In diversen Studien wurden deshalb Einflussgrößen auf die Impedanz des Hand-Arm-Systems untersucht. Hierbei haben sich insbesondere die Andruckkraft (Lage Burström,

1997; Matthiesen, Mangold & Bruchmueller, 2018), Greifkraft (Besa et al., 2007; Lage Burström, 1997; Matthiesen, Mangold & Bruchmueller, 2018), Körperhaltung (Matthiesen, Mangold & Bruchmueller, 2018), Form des Griffes (Aldien, Marcotte, Rakheja & Boileau, 2005; Schröder et al., 2020) sowie Anregungsrichtung (Besa et al., 2007; Dong et al., 2012; Tarabini et al., 2013) herauskristallisiert.

Nach Kern (2009) gibt es neben der passiven Interaktion eine bewusste aktive Interaktion. Die dabei auftretende Bewegung wird durch die Muskelkräfte hervorgerufen und kann bei einem Menschen nicht schneller als 8 Hz (Kern, 2009) betragen. Dieser Wert ist auf die Bewegung der Finger bezogen. Bewegungen des gesamten Armes oder Körper können sogar nur Bewegungen von maximal 2 Hz ausführen, mit der weiteren Einschränkung, dass die Bewegungen geplant sein müssen. Neben den bewussten Aktionskräften, welche durch die Muskelkraft hervorgerufen werden, wirkt in dem bandbreitenbegrenzten Bereich noch die statische Massenkraft. Je nachdem in welche Richtung die statischen Massenkkräfte wirken, unterstützen diese, die durch die Muskeln erzeugten Aktionskräfte oder wirken ihnen entgegen. Im letzteren Fall müssen die Muskeln die statischen Massenkkräfte kompensieren.

Die bandbreitenbegrenzten Kräfte – alle bis auf die dynamischen Massenkkräfte –, welche bei der Nutzung von Power-Tools vom Anwender auf das technische System aufgebracht werden, werden in der DIN 45679 (DIN 45679) beschrieben. Diese Norm hat den Zweck, grundlegende Messmethoden zur Erfassung der Anwenderkräfte aufzuzeigen sowie die auftretenden Anwenderkräfte zu deklarieren. Die dort beschriebenen Methoden zur Messung der Ankopplungskräfte dienen in erster Linie dazu, die auf das menschliche Hand-Arm-System übertragenen Schwingungen beurteilen zu können. Hierbei wird zwischen direkten und indirekten Messmethoden unterschieden. Die direkten Messmethoden beziehen sich auf Messtechniken, die die Kraft am zu ermittelnden Messort erfassen. So können beispielsweise anhand von Kraftmessfolien die Kräfte zwischen dem Anwender und dem Power-Tool gemessen werden (Kalra, Rakheja, Marcotte, Dewangan & Adewusi, 2015; Kaulbars, 2006; Kaulbars & Lemerle, 2007; Matthiesen & Uhl, 2017). Nachteilig an diesen Verfahren ist, dass dadurch die Interaktion des Systems, bestehend aus Mensch und Power-Tool, das Empfinden sowie die Impedanz beeinflusst wird. Im Gegensatz zu den direkten Messverfahren wird beim indirekten Verfahren die zu ermittelnde Kraft nicht in der Schnittstelle zwischen Power-Tool und Anwender gemessen. Dies hat den Vorteil, dass diese Schnittstelle dadurch nicht manipuliert wird. Zu den indirekten Verfahren gehört das Messen mittels Kraftmessplatte. Dabei wird der Anwender während des Arbeitens auf einer Kraftmessplatte positioniert. Hierdurch können die statischen bzw. niederfrequenten Kräfte bestimmt werden. Dieses Verfahren bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass

bei schnellen Bewegungen des Anwenders die dynamischen Massenkräfte bzw. Trägheitskräfte ebenfalls gemessen werden. Im Folgenden wird auf die verschiedenen Arten von Kräften eingegangen, die vom Anwender auf das Elektrowerkzeug einwirken (siehe Abbildung 3.2). Die Ankopplungskraft setzt sich aus der Summe der rechnerischen Mittel von Andruck- und Greifkraft zusammen. Alle Kräfte, die vom Anwender in Vorschubrichtung auf das Elektrowerkzeug übertragen werden und nicht in der Ankopplfläche aufgehoben werden (Greifkräfte), werden als Andruckkraft bezeichnet. Eine Kraft, welche in negativer Andruckkraft-Richtung wirkt, wird als Zugkraft bezeichnet. Aufgebrachte Kräfte, die in der horizontalen Ebene senkrecht zur Andruckkraft wirken und nicht den Greifkräften zugeordnet sind, werden als Führungskräfte bezeichnet. Weiterhin wird die Hebekraft beschrieben, die vom Anwender aufgebracht wird, um das Elektrowerkzeug zu halten und damit der Gewichtskraft entgegenwirkt. Die dreidimensionale Kraft, welche zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück wirkt, wird Vorschubkraft genannt. In dieser Arbeit wird zum besseren Verständnis die Vorschubkraft, welche den Winkelversatz  $\beta$  zur Vorschubrichtung aufweist, aufgeteilt. Die Kraft in Vorschubrichtung, die zum eigentlichen Bohrfortschritt dient, wird weiterhin Vorschubkraft bezeichnet. Anteile senkrecht zur Vorschubrichtung werden Querkraft genannt. Wie in Abbildung 3.2 zu sehen ist, kann die Gewichtskraft des Power-Tools bei der Aufbringung unterstützen oder muss sogar zusätzlich in Form einer höheren Andruck- oder Führungskraft aufgebracht werden.

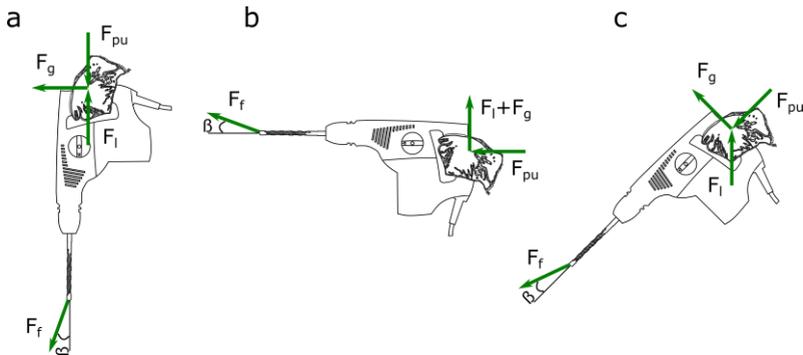


Abbildung 3.2: Darstellung der unterschiedlichen Wirkrichtung der Andruck- ( $F_{pu}$ ), Vorschubkraft ( $F_f$ ), Führungskraft ( $F_g$ ) und Hebekraft ( $F_I$ ) in Abhängigkeit der Bohrhammerorientierung

### 3.1.3 Abbildung der Anwenderkräfte auf Prüfständen

Das Abbilden des Menschen in Versuchsumgebungen ist notwendig, um im Testing und in wissenschaftlichen Studien kontrollierbare und reproduzierbare Randbedingungen vorliegen zu haben. Deshalb werden die statischen und dynamischen Aktionskräfte, welche von dem Anwender auf den Bohrer wirken, in diversen Studien untersucht und teilweise auf Prüfständen abgebildet.

Die entsprechend dem aktuellen Stand der Forschung untersuchten bandpassbegrenzten Kräfte des Anwenders beim Hammerbohren sind die Andruck- sowie Greifkraft. Da eine gewisse Andruckkraft bzw. Vorschubkraft notwendig ist, damit ein Bohrer sich in einem stabilen Betriebspunkt befindet, muss diese bzw. ihr Einfluss auf jedem Prüfstand abgebildet werden. Neben Gewichten mit Umlenkrollen (Cronjäger et al., 1984) werden auch elektrische (Rempel, Barr & Antonucci, 2017) und pneumatische (Bruchmüller, 2019) Antriebe zur Aufbringung der Andruckkraft eingesetzt. In allen Studien zur Untersuchung des Einflusses der Andruckkraft auf Prüfständen, wird diese als Konstantkraft aufgebracht. Da Prüfstände eine Fixierung des Bohrers benötigen, wurde somit in gewisser Weise auch eine Greifkraft erzeugt. Am Hauptgriff werden die Andruck- und Greifkraft analog zur realen Anwendung an den gleichen Stellen eingeleitet. Der Seitengriff ist auf Prüfständen hingegen oftmals demontiert, weshalb die Anwenderkräfte dort vernachlässigt werden. Weiterhin wird die Greifkraft lediglich in der Versuchsumgebung von Cronjäger et al. (1984) gezielt eingestellt, indem eine Greifkraftmessung in den Bohrergriff implementiert wurde. In Forschungsarbeiten bei denen das Verhalten von Piloten simuliert wurden, gab es Ansätze, um den menschliche Regelkreis nachzubilden (Johannsen, Boller, Donges & Stein, 1977; Johannsen, 1993). Hierdurch wird bei einer Kraftregelung ein unnatürlich langsames oder schnelles Nachregeln verhindert. Gwosch et al. (Gwosch, Dörr & Matthiesen, 2021) wendeten in einer Simulation eine derartige Nachbildung der menschlichen Regelung erstmalig im Umfeld von Power-Tools an. Die bereits beschriebene Querkraft wurde bislang in keinen wissenschaftlichen Studien untersucht bzw. abgebildet.

Neben den bandpassbegrenzten Kräften erzeugt der Anwender durch seine Schwingungscharakteristik dynamische Massenkräfte. Diese Schwingungseigenschaften des Menschen werden zumeist in Form der mechanischen Impedanz beschrieben. Seit Jahrzehnten gibt es Bemühungen diese Eigenschaften auf Prüfständen abzubilden. Hierfür werden zumeist mechanische Lösungen in Form von Masse-Dämpfer-Feder-Systemen genutzt. Die Auslegung erfolgt anhand der mechanischen Impedanz oder explorativ anhand eines systematischen Austauschs von Prüfstandskomponenten sowie einer Bewertung

der Ergebnisse auf Basis von Experimenten. Eine Herausforderung ist, dass die theoretischen Hand-Arm-Modelle (HAM) oftmals sehr geringe Steifigkeiten und Massen besitzen, welche in physischen Systemen nicht als Anbindung realisiert werden können (Rakheja, Wu, Dong, Schopper & Boileau, 2002; Schenk, 2000).

1984 stellten Cronjäger et al. (1984) und später Jahn & Hesse (1986) eine Untersuchungen vor, bei der das Ziel verfolgt wurde, ein physisches HAM für Bohrhämmer mittlerer Gewichtsklassen zu entwickeln. Die Vorauslegung des Modells erfolgte auf Basis der aus der Literatur bekannten HAM. In einem weiteren Schritt wurden die einzelnen Feder- und Dämpfungselemente variiert, um das Modell den Ergebnissen manueller Studien anzupassen. Im Vergleich zu allen weiteren bekannten HAM-Entwicklungen wurde dabei die Greifkraft gemessen und auf dem Prüfstand gezielt eingestellt. Als Bewertungsgrößen wurde neben der Gehäuseschwingung, die Vorschubgeschwindigkeit sowie die Stromaufnahme analysiert und bei der Optimierung mitberücksichtigt. Es hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse vom Prüfstand sehr gut mit denen aus der manuellen Studie übereinstimmten.

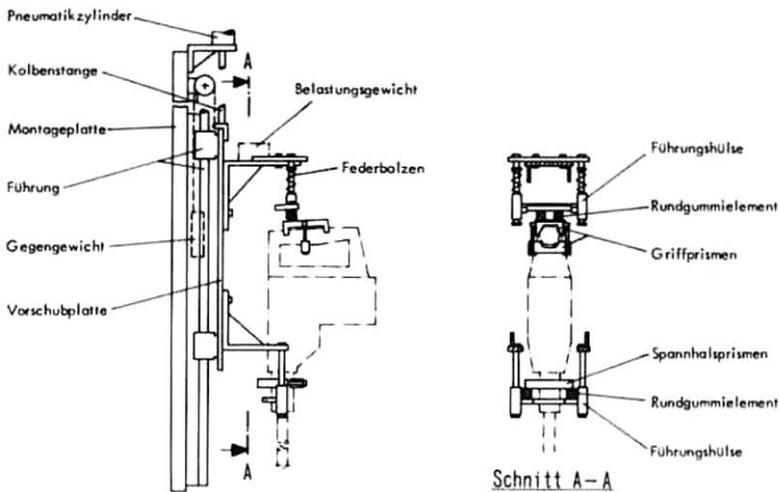


Abbildung 3.3: Von Cronjäger et al.(1984) entwickelter Bohrprüfstand zur Bewertung der Vorschubgeschwindigkeit, Stromaufnahme und Bohrhämmervibrationen

In der Abbildung 3.4 ist ein Prüfstand mit einem HAM von Marcotte, Boutin & Jasinski. (2010) dargestellt. Ziel des Aufbaus ist die Simulation der Hand-Arm-Schwingungseigenschaften bei der Nutzung von Meißelhämmern. Entwickelt wurde das Modell auf Basis der scheinbaren Masse, welche durch Ableitung der mechanischen Impedanz berechnet werden kann. Das entwickelte HAM besitzt zwei Freiheitsgrade und ist für Meißelhämmer mit einer Frequenz unterhalb von 50 Hz ausgelegt worden. Über 50 Hz hat das Modell eine starke Phasenverschiebung gegenüber der scheinbaren Masse des Menschen. Eine Validierung des Systems fand zunächst an einem Shaker und anschließend im Vergleich zum Menschen (siehe Abbildung 3.4 linkes Bild) statt. Der Vergleich gegenüber dem Ein-Hand-Betrieb der Anwender hat gezeigt, dass der  $a_{HV}$ -Wert nur sehr gering abwich. Diese Arbeitsweise ist jedoch nur bedingt auf das manuelle Hammerbohren übertragbar.



Abbildung 3.4: Durchführung der Verifizierung des entwickelten Hand-Arm-Modells (linkes Bild) sowie Hand-Arm-Modell mit Prüfstand (rechtes Bild) (Marcotte et al., 2010)

Auch heutzutage werden mechanische Ersatzmodelle für die Untersuchung von Bohrhämmern entwickelt. Rempel et al. stellte 2017 ein HAM (siehe Abbildung 3.5 links) vor, anhand dessen reproduzierbare Bohrversuche in horizontaler Bohrrichtung durchführbar waren. Mit dem Prüfstand (Abbildung 3.5 rechts) wurde das Ziel verfolgt, die Anwenderbelastung durch Lärm, Vibration und Staub während

dem Hammerbohren zu untersuchen. Das entwickelte Modell wurde anhand von Mittelwerten und Maximalwerten des  $a_{HV}$ -Wertes gegenüber den Ergebnissen von fünf Probanden validiert. In der Veröffentlichung fehlen die Angaben über die Eigenschaften der Einzelkomponenten, wie Feder oder Dämpfereigenschaften. Dadurch ist es nicht möglich das System nachzubilden.

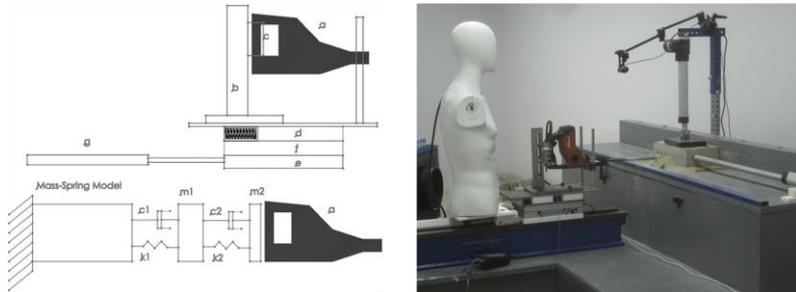


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Hand-Arm-Modells (links) sowie eine gesamte Abbildung des Prüfstands beim Hammerbohren (rechts) (Rempel, Barr et al., 2017)

Im Stand der Forschung sind weitere HAM (Dobry & Barczewski, 1996; Golysheva, Babitsky & Veprik, 2004; Kinne, Schenk & Knoll, 1997) bekannt. Diese besitzen jedoch nicht die gleiche Gültigkeit wie die bereits beschriebenen HAM beziehungsweise weisen größere Nachteile (siehe Tabelle 3.1) als diese auf.

Einstellbare physische HAM zur Abbildung der Konstitutionen unterschiedlicher Anwender oder Anpassung an variierende Vorschub- und Greifkräfte wie von Mangold (2019) für einen Impulsschrauber vorgestellt, sind für Bohrhämmer bislang nicht bekannt.

Tabelle 3.1: Übersicht der bekannten Hand-Arm-Modelle mit Beschreibung deren Gültigkeit und Nachteile

<b>Hand-Arm-Modell</b>	<b>Gültigkeit / Nachteile</b>
<b>Cronjäger</b> (Cronjäger et al., 1984)	- Nur für vertikales Bohren nach unten gültig - Gültig für Vibration, Vorschubgeschwindigkeit und Stromaufnahme
<b>Dobry</b> (Drbry & Barczewski, 1996)	- Gewählte Parameter für HAM wurden nicht beschrieben
<b>Kinne</b> (Kinne, schenk & knoll, 1997)	- Kein Abgleich mit Vorschubgeschwindigkeit oder Stromaufnahme
<b>Golysheva</b> (golysheva, babitsky & veprik, 2004)	- Keine Aufnahme von Querkräften durch Einspannungsart möglich
<b>Marcotte</b> (marcotte et al. 2010)	- Nur für vertikales Bohren nach unten gültig - Gültig für Schlagfrequenzen bis 40 Hz - Keine Aufnahme von Querkräfte durch Einspannungsart möglich
<b>Rempel</b> (rempe, Barr et al. 2017)	- Nur für horizontales Bohren gültig - Gewählte Parameter für HAM wurden nicht beschrieben

### 3.1.4 Fazit

Bei der Nutzung von Power-Tools bringt der Anwender Kräfte auf das Power-Tool auf. Diese können in bandbreitenbegrenzte und passiv-dynamische Aktionskräfte unterteilt werden. Beim Hammerbohren sind die bandbreitenbegrenzten Andruck-, Führ-, Greif- und Hebekraft relevant, welche in der DIN 45679 (DIN 45679) beschrieben sind. Aus diesen Kräften, in Kombination mit dem Gerätegewicht, resultiert die Vorschubkraft. Diese wirkt zwischen Werkzeug und Untergrund. Die Kraft in Vorschubrichtung, welche zum eigentlichen Bohrfortschritt dient, wird als Vorschubkraft bezeichnet. Anteile senkrecht zur Vorschubrichtung werden

Querkräften genannt. Im aktuellen Stand der Forschung wurde im Kontext Bohrhammer lediglich auf die Andruck- und Vorschubkraft in Bohrrichtung eingegangen. Die Querkräfte wurden in Forschungsarbeiten bislang nicht beschrieben.

Die passiv-dynamischen Aktionskräfte sowie die Muskelkräfte hängen stark vom Anwender ab. Wichtig hierbei sind der Trainingszustand des Anwenders und dadurch die maximalen Aktionskräfte sowie die Ermüdungserscheinungen der Muskeln. Für manuelle Studien im Umfeld von Bohrhämmern sollte deshalb darauf geachtet werden, dass Probanden aus der Baubranche eingesetzt werden, um eine repräsentative Stichprobe garantieren zu können.

Die Einflüsse der passiv-dynamischen Aktionskräfte auf die Gehäuseschwingung wurden bereits in diversen Studien untersucht und daraufhin HAM abgeleitet. Auf Basis dieser Modelle ist es möglich die Schwingungseigenschaften des Menschen auf Prüfständen abzubilden. Um eine Vergleichbarkeit zu gemessenen  $a_{hv}$ -Werten basierend auf der DIN EN ISO 28927-10 (DIN EN ISO 28927-10) gewährleisten zu können, sollte ein HAM gewählt werden, welches ein vertikales Bohren nach unten erlaubt. Weiterhin muss dieses Querkräfte aufnehmen können. Im Stand der Forschung kann die Auswahl somit auf zwei HAM reduziert werden. Da im Gegensatz zum Modell von Kinne et al. (1992) das HAM von Cronjäger et al. (1984) auch hinsichtlich der Vorschubgeschwindigkeit sowie der Stromaufnahme mit manuellen Versuchen abgeglichen wurde, sollte dieses für Versuche zur Untersuchungen hinsichtlich der Arbeitsproduktivität und der Bohrhammervibrationen herangezogen werden.

### **3.2 Einflussgrößen auf die Produktivität beim Hammerbohren**

Die Produktivität ist eine wichtige Größe für Betriebe bzw. Handwerker, damit der Betrieb wirtschaftlich agieren kann. Die Arbeitsproduktivität ist definiert als der Quotient von der Ausbringungsmenge und der Einsatzmenge und beschreibt somit wie effizient eine Tätigkeit erfüllt werden kann. Bezogen auf die Tätigkeiten mit einem Bohrhammer kann die Größe Arbeitsproduktivität entweder mit den kumulierten Bohrmeter pro Jahr bzw. Tag oder mit der Bohrzeit für eine Bohrung gleichgesetzt werden. Bezogen auf eine oder mehrere Bohrungen wird im Stand der Forschung hauptsächlich die Vorschubgeschwindigkeit oder kurz ROP (englisch: rate of penetration) verwendet (Botti et al., 2020; Cronjäger & Jahn, 1985; Hecker, 1983; Rempel, Antonucci et al., 2019). Diese beschreibt in welcher Zeitdauer ein bestimmter Bohrweg erreicht wird und wird zumeist in mm/s angegeben. Botti et al.

(2020) untersuchten die Produktivität beim Hammerbohren über einen Tag hinweg. Dafür wird die Vorschubgeschwindigkeit mit den entstehenden Gehäusevibrationen verglichen, welchen Anwender nur über einen bestimmten Zeitraum ausgesetzt sein dürfen (siehe Kap. 3.3). Eine weitere Größe zur Bewertung der Produktivität ist das abgetragene Volumen pro Zeit (Schenk, 1997; Vonnemann, 1977). Bei dieser Messgröße wird somit der Durchmesser des Bohrers mitberücksichtigt. Anhand des XiL-Ansatzes für Power-Tools (Matthiesen, Behrendt et al., 2018) kann der Einfluss der Teilsysteme Anwender, technisches System und Umwelt, insbesondere des Untergrundes, auf die ROP betrachtet werden.

### **3.2.1 Einfluss des Anwenders**

Die Einzelkomponenten des Schlagwerks eines Bohrhammers müssen aufeinander abgestimmt sein, um effizient arbeiten zu können. Damit der Bohrhammer diesen stabilen Betriebspunkt bzw. -bereich erreicht, muss der Anwender eine Mindestdruckkraft aufbringen (Riederer, 1985; Vonnemann, 1977). Diese wird durch die dynamischen Kräfte, die im Bohrhammer auftreten, beeinflusst. Heben sich diese Kräfte über eine Schlagperiode hinweg im Mittel auf, können sie vernachlässigt werden. So sind Kräfte, welche in der Luftfeder und weiteren Stoßvorgängen entstehen, im Gegensatz zu den Trägheitsmassen des Antriebskolbens relevant (Riederer, 1985). Durch diverse Studien konnte in den vergangenen 40 Jahren nachgewiesen werden, dass die Andruckkraft auch oberhalb der Mindestdruckkraft einen Einfluss hat. So schloss Hecker in seiner Studie, in der er primär die Einflussfaktoren auf die Geräuschemission untersuchte, auf eine Steigerung der ROP durch die Erhöhung der Vorschubkraft auf einem Prüfstand (Hecker, 1983). In Heckers Studie ist durch die geringe Versuchsanzahl von drei Einzelnachweisen, jedoch nicht davon auszugehen, dass dies einen statistischen Nachweis bietet. Rempel, Barr & Cooper (2019) zogen für die Analyse des Einflusses der Vorschubkraft auf die ROP ein prüfstandbasiertes Experiment von Botti et al. (2017) mit gleichem Versuchsaufbau heran. Dadurch konnten sie die Erkenntnisse von Hecker bestätigen, dass eine Erhöhung der Vorschubkraft von 88 N auf 150 N einen geringen Einfluss auf die ROP hat. Sie beobachteten eine durch die Vorschubkrafteerhöhung verursachte Steigerung der ROP von 9.09 mm/s auf 9.7 mm/s (Rempel, Barr et al., 2019). Darauf aufbauend untersuchen Botti et al. (2020) in einer weiteren Studie den Zusammenhang zwischen verschiedenen Vorschubkräften und der ROP (siehe Abbildung 3.6). Sie beschrieben einen mit dem Anstieg der Vorschubkraft von 95 N auf 185 N verbundenen Anstieg der ROP von 7,2 auf 8,5 mm/s und dass bei einer weiteren Erhöhung der Vorschubkraft auf 211 N kein weiterer Anstieg der ROP zu beobachten war. Da die Untersuchungen von Rempel et al. als auch Botti et al. jeweils auf lediglich einem Bohrer- und

Bohrhammer-Modell basierten, wiesen die Autoren darauf hin, dass eine Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf andere Modelle noch zu überprüfen wäre. Diese mögliche systemspezifische Einschränkung wird weiter durch eine Studie von Schäfer (2018) bestärkt. Anhand von prüfstandbasierten Versuchen konnte Schäfer zeigen, dass bei einem akkubetriebenen Bohrhammer die ROP über einen Vorschubkraftbereich von 40 bis 220 N tendenziell abnahm. Da hierbei jedoch keine statistischen Methoden eingesetzt wurden, konnte für diesen Trend keine Signifikanz nachgewiesen werden. In den durchgeführten Versuchen nahm die Drehzahl durch die Erhöhung der Vorschubkraft um 23 % ab. Dieser starke Einbruch der Drehzahl wurde als Begründung für den Abfall der ROP herangezogen. Weiter stellten Kivade, Murthy & Vardhan (2015) anhand eines Experiments mit einem pneumatischen Bohrhammer in Kombination mit einem Hohlbohrern mit 30 mm Durchmesser fest, dass die ROP mit dem aufgebracht Druck anstieg bis ein Maximum erreicht war und bei höheren Drücken wieder abfiel. Der beobachtete Hochpunkt der ROP wurde hier so erklärt, dass der erhöhte Druck einen kompletten Rückhub des Bohrmeißels verhindert und dass bei einem weiteren Anstieg des Druckes der Meißel einen Zustand erreicht, bei dem ein Strömungsabriss vorliegt, da der Spalt zwischen Bohrspitze und Untergrund zu gering wird. Hierdurch kann das Bohrmehl nicht mehr abtransportiert werden (Kivade et al., 2015). Aufgrund der unterschiedlichen Systemkomponenten kann dieses Verhalten nicht ohne Überprüfung auf elektropneumatische Bohrhämmer übertragen werden.

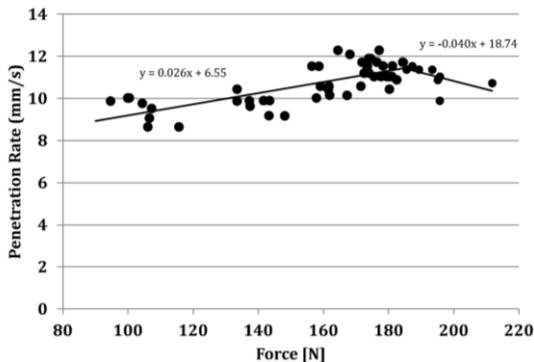


Abbildung 3.6: Zusammenhang der Vorschubkraft und Vorschubgeschwindigkeit für das untersuchte System TE 70 von Hilti mit einem Wendelbohrer (Botti et al., 2020). Die Ergebnisse wurden auf einem Prüfstand erzeugt.

Die Auswirkungen von Querkräften auf die Produktivität sowie mögliche Interaktionen mit anderen Einflussfaktoren wurden bislang nicht erforscht. Momeni et al. (2017) beschreiben jedoch, dass in ihrer Studie geübte Bediener geringe Querbewegungen aufgebracht hatten, wodurch in Kombination mit dem Variieren der Vorschubkraft die Bohrlochreibung verringert werden konnte. Die dabei entstehenden Querkräfte oder ihr direkter Einfluss wurden in dieser Studie nicht analysiert. In einer Studie zur Abbildung der Schwingungseigenschaften von Anwendern auf einem Prüfstand beschrieben Cronjäger et al. (1984), dass es hierbei entscheidend ist, dass der Bohrer entlang der Vorschubrichtung ausgerichtet sein muss, da ansonsten Querkräfte aufkommen, welche die Vibrationswerte beeinflussen können.

Nach aktuellem Stand der Forschung gibt es diverse Studien, welche die Schwingungseigenschaften des Menschen sowie dessen Einfluss auf die Gehäuseschwingung untersucht haben (siehe Kapitel 3.3). Ob das Hand-Arm-System bzw. die Schwingungseigenschaften des Menschen oder die von ihm aufgetragenen Querkräfte die Vorschubgeschwindigkeit beeinflussen, wurde bislang nicht untersucht.

### **3.2.2 Einfluss des technischen Systems**

Das technische System beim Hammerbohren besteht aus dem Bohrhämmer sowie dem Bohrer. Im Folgenden wird zunächst auf die im Stand der Forschung durch den Bohrhämmer bekannten Einflüsse auf die ROP eingegangen. Anschließend folgt die Betrachtung des Bohrers.

Wie im Kapitel 2 beschrieben kann die Anordnung des Motors sowie der Aufbau des Schlagwerkes von Bohrhämmern stark variieren. Hecker & Riederer (1985) sowie Rempel, Antonucci et al. (2019) haben nachgewiesen, dass die unterschiedliche Gestalt von Bohrhämmern die ROP beeinflussen. In weiteren Experimenten wurden die Einflussgrößen sowie deren genauen Zusammenhänge mit der ROP untersucht. Hierbei hat sich gezeigt, dass insbesondere die Schlagleistung von entscheidender Rolle ist. Diese wird durch das Produkt aus der Einzelschlagenergie sowie der Schlagzahl bzw. Schlagfrequenz berechnet. Somit erhöht eine hohe Einzelschlagenergie (Gruner & Knoll, 2000; Hecker & Riederer, 1985) sowie Schlagzahl (Cronjäger & Jahn, 1985) den Vorschub. Die Schlagzahl wird maßgeblich durch die Motordrehzahl sowie deren Übersetzung bestimmt. Die Einzelschlagenergie hingegen hängt von deutlich mehr Größen ab. Eine hohe Energiedichte gepaart mit einer hohen Schlagenergie zu erreichen ist eine große Herausforderung in der Entwicklung von Bohrhämmern. Bei der Auslegung des Schlagwerkes ist es entscheidend, dass die Einzelkomponenten aufeinander

abgestimmt sind, um eine optimale Energieübertragung bzw. Wellenausbreitung garantieren zu können. Hierbei spielen beispielsweise die Übertragungsfläche, Dichte und Gestalt (Hecker, 1983) sowie die Anzahl der Komponenten bzw. die Stoßstellen der Komponenten (Riederer, 1985) eine Rolle. Neben diesen Größen muss ebenfalls die Schlagwerkstemperatur genannt werden, welche die Schmierstoffviskosität bzw. Reibwerte zwischen den Schlagwerkskomponenten (Cronjäger & Jahn, 1985) verändert. Wird ein Bohrhämmer im kalten Zustand betrieben, steigt seine Temperatur zunächst rapide und dadurch auch die ROP an. Nach einer gewissen Zeit erreicht das Gerät seine Betriebstemperatur, worauf diese nahezu konstant bleibt. Neben der Schlagleistung ist die Wahl des Umsetzwinkels eine der relevantesten Größen bezüglich der ROP. Dieser wird durch das Verhältnis zwischen der Schlagfrequenz und der Bohrerzahl definiert. Der Umsetzwinkel sollte dabei so gewählt werden, dass die Bohrerschneide nicht immer in die gleiche Kerbe schlägt (Vonnemann, 1977).

Neben dem Bohrhämmer beeinflussen die Gestalt und die Eigenschaften des Bohrers (Cronjäger & Jahn, 1985) die Vorschubgeschwindigkeit. Beispielsweise erzielen Hohlbohrer durch die verbesserte Bohrmehlförderung eine höhere ROP, da sich weniger Bohrklein am Bohrgrund befindet, welches die Schlagenergieübertragung in den Untergrund dämpft (Hecker & Riederer, 1985). In mehreren Studien wurde der Einfluss des Durchmessers auf die ROP untersucht und nachgewiesen (Gruner & Knoll, 2000; Hecker & Riederer, 1985; Schenk, 1997; Vonnemann, 1977). In diesen Studien hatte sich gezeigt, dass je größer der Durchmesser des Bohrers ist, desto geringer ist die ROP. Vonnemann (1977) konnte jedoch zeigen, dass es bezüglich des abgetragenen Volumens pro Zeit ein Optimum des Bohrerdurchmessers bei etwa 22 mm gibt und erklärte dies anhand dem Verhältnis aus Energie zu Schneidenbreite bzw. der Kontaktfläche der Schneide mit dem Untergrund. Ist dieses Verhältnis zu klein, dringt die Schneide nicht mehr tief genug in den Untergrund ein. Dies führt zu kleineren Ausbrüchen im Material. Wird der Bohrerdurchmesser weiter verringert, steigt jedoch der Feinkornanteil an, wodurch der Abtransport erschwert wird und dadurch das Abtragsvolumen je Zeitdauer wieder abfällt. Weitere Experimente zeigten, dass der Werkstoff (Weinert, Michel & Gillmeister, 1993) und die Gestalt des Bohrers und insbesondere der Schneide (Gruner & Knoll, 2000; Schenk, 1997; Weinert et al., 1993; Weinert, Gillmeister & Michel, 1994) den Abtragprozess beeinflussen.

Die ursprüngliche Gestalt des Bohrers verändert sich über die Gebrauchsdauer des Bohrers aufgrund von Verschleiß. Dies wirkt sich negativ auf die ROP aus (Weinert et al., 1993). Um den Verschleiß mikro- und makroskopisch bewerten zu können, wurden im Bereich der Gesteins- und Betonbohranwendungen Untersuchungsmethoden (Antonov, Veinthal, Yung, Katušin & Hussainova, 2015;

Botti et al., 2017; Saai et al., 2020) und Auswerteverfahren (Botti et al., 2017; Ersoy & Waller, 1995) entwickelt. Anhand solcher Methoden konnte nachgewiesen werden, dass neben der Bohrschneidengeometrie (Gruner & Knoll, 2000; Weinert et al., 1993) und dem Bohrschneidmaterial (Carreño-Morelli, Alveen, Moseley, Rodriguez-Arbaizar & Cardoso, 2021; Momeni et al., 2017; Moseley, Peters & Momeni, 2020; Weinert et al., 1993) auch die Werkzeugtemperatur (Momeni et al., 2017; Xuefeng & Shifeng, 1994) und der Bohrhammer (Momeni et al., 2017) einen Einfluss auf das Verschleißverhalten der Bohrschneide haben. Weiterhin wurde in einer Studie von Flegner et al. (Flegner et al., 2016) für Kernbohrer mit Wasserspülung gezeigt, dass die von der Maschine aufgebrachte Andruckkraft einen Einfluss auf den Bohrerverschleiß hatte. Ob sich dieser Effekt auf handgeführte elektropneumatische Bohrhämmer mit Wendelschaft übertragen lässt, wurde bislang noch nicht nachgewiesen.

Anhand diverser Experimente (Antonov et al., 2015; Momeni et al., 2017; Tillmann, 1997) konnte nachgewiesen werden, dass der Verschleiß bei Bohrern durch die Drehbewegung sowie den Schlag entsteht. Somit überwiegt in Bereichen in der Nähe der Zentrierspitze der Verschleiß durch Ermüdung bzw. Pitting. Abrasiver Verschleiß nimmt dagegen je mehr zu, desto höher die Drehgeschwindigkeit ist und somit am stärksten am Umfang des Bohrers. Tillmann (1997) stellte in seiner Veröffentlichung eine Gleichung vor, welche diesen Verschleiß der Schneide je Schlag beschreibt. Der Einfluss des Verschleißes bzw. der kumulierten Bohrmeter auf die ROP wurde bislang in mehreren Studien für zweischneidige Wendelbohrer untersucht. Weinert et al. (1993) wiesen in ihrem Experiment den Einfluss des Bohrerverschleißes auf die ROP für unterschiedliche Schneidwerkzeugmaterialien und -spitzenwinkel nach. Sie konnten zeigen, dass über eine Gebrauchsdauer von zwölf kumulierten Bohrmeter die ROP linear um etwa 30 % abnahmen. Eine Abnahme der ROP aufgrund des Bohrerverschleißes wurde ebenso von Gruner & Knoll (2000) dokumentiert. Bei dessen Studie wurden für unterschiedliche Geräte und Bohrer der Zustand zu Beginn und nach einer definierten Anzahl an kumulierten Bohrmeter bestimmt. Aktuellere Experimente (Antonucci, Barr, Martin & Rempel, 2017; Botti et al., 2017; Carty et al., 2017; Rempel, Antonucci, Barr & Martin, 2017) bestätigten zwar die Abnahme der ROP aufgrund von Verschleiß, jedoch nahm in diesen Studien die ROP auf den ersten Bohrmeter stärker ab. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen verringerte sich die ROP hingegen nur noch geringfügig. Botti et al. (2017) zeigten hierbei, dass die Standardabweichung der ROP über die kumulierten Bohrmeter tendenziell zunimmt und dass die Veränderung der Größen  $\alpha'$ ,  $\beta'$ , L, R und D (siehe Abbildung 3.7) mit der Abnahme von ROP korrelieren.

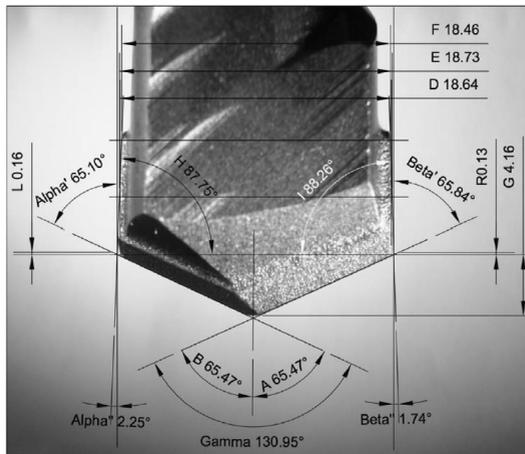


Abbildung 3.7: Von Botti et al. (2017) verwendete Parameter zur Bewertung des Verschleißes an der Bohrerspitze

### 3.2.3 Einfluss des Untergrundes

Bohrhämmer werden dafür genutzt, um mineralisches Material zu bearbeiten. Hierbei kann es sich entweder um ein natürliches Mineral wie Sandstein und Granit oder ein Stoffgemisch handeln. Während Maschinen, die im Bergbau eingesetzt werden, hinsichtlich natürlichem Mineral optimiert werden, werden Bohrhammer im Baugewerbe hauptsächlich für Beton genutzt. Diese Untergrundart ist inhomogen und besteht zumeist, je nach Festigkeit, aus kleineren oder größeren Kieselsteinen als Zuschlagstoff und Zement als Bindemittel. Die genaue Zusammensetzung sowie Bezeichnung von Beton ist in der DIN 206 (DIN EN 206) definiert.

Um ein Verständnis über den Einfluss des Bohrhammers auf die Vorschubgeschwindigkeit aufbauen zu können, müssen die Mechanismen analysiert werden, welche zu einem Abtrag des Materials führen. Diese können in drei Fälle unterteilt werden. Grundsätzlich kann bei der Analyse des Einflusses des Untergrundes auf den ROP das Verhalten während eines Bohrhammerschlags (Fall 1 und 2) oder über eine komplette Bohrung (Fall 3) hinweg betrachtet werden. Bei der Betrachtung des Bohrfortschritts je Bohrhammerschlag können weitere Unterscheidungen getroffen werden. Der Bohrhämmer erzeugt mittels der Kolbenbewegung eine Schlagbewegung des Flugkolbens. Dies führt zunächst zum Eindringen des Bohrers in den Untergrund (Fall 1). Aufgrund von Wellenreflexionen

im Bohrer bzw. des Rückpralls auf den Zwischenkolben dringt das Werkzeug stufenweise in den Untergrund ein (Fall 2). Im Folgenden werden in der Einflussanalyse deshalb diese drei unterschiedlichen Fälle unterschieden.

Bei der Analyse eines einzelnen Eindringvorganges des Bohrers in den Untergrund wird im Stand der Forschung die Kraft-Eindringkurve bzw. Zerspankraftfunktion verwendet, um die Charakteristik eines Untergrundwerkstoffes zu beschreiben. Insbesondere für pneumatische Bohrhämmer zum Einsatz in Naturstein wurden diverse Methoden (Chiang, 2004; Franca, 2011; Hustrulid & Fairhurst, 1971b, 1972a) zur Untersuchung dieser Kurven für Natursteine entwickelt sowie Gleichungen aufgebaut, um die Zusammenhänge beim Abbauprozess zu beschreiben (Hustrulid & Fairhurst, 1971a, 1972b; Lundberg & Okrouhlik, 2006; Lundberg & Collet, 2010). Die in diesem Forschungsfeld gewonnenen Erkenntnisse sind bezüglich des Einzelschlages einer Bohrspitze sehr gut auf das Bohren in Beton mit einem elektropneumatischen Bohrhämmer übertragbar. Studien von Vonnemann (1977) und Hecker (1983) zeigten, dass die Zerspankraftfunktion bei Beton ebenfalls anhand zweier Geraden beschrieben werden kann. Während des Eindringvorganges der Schneide weist der Beton ein elastisch-plastisches Verhalten auf. Anschließend tritt ein elastischer Rückprall der Schneide bzw. des Bohrers auf, wenn dieser wieder in Richtung des Bohrhammers zurückgefedert wird. Anhand weiterer Untersuchungen zeigte Hecker, dass sowohl die Steigung der Eindring- als auch Rückprallgerade größer sind, je härter das Untergrundmaterial (siehe Abbildung 3.8) ist. Vonnemann zeigte auf, dass der Bohrfortschritt einerseits durch den größeren Materialwiderstand abnimmt, und andererseits sich durch die daran gekoppelte schlechtere Energieübertragung bzw. dem Wirkungsgrad vom Bohrer in den Untergrund ebenfalls verringert.

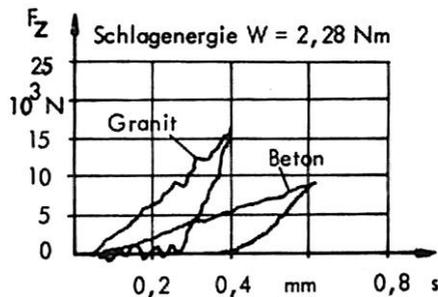


Abbildung 3.8: Experimentell ermittelte Zerspankraftfunktion von Beton und Granit (Hecker, 1983)

Vonnemann (1977) zeigte weiterhin, dass sich zwar zu Beginn des Eindringvorganges sowie am Ende die Kurve leicht nichtlinear verhält, er kam jedoch zu dem Schluss, dass der Eindring- und Rückprallvorgang jeweils als linear betrachtet werden können. Diese Rückschlüsse haben bereits Hustrulid & Fairhurst (1971a) für Bohren in Gestein getroffen. Im Zuge von Untersuchungen durch Vonnemann zeigte sich, dass die Kraft während dem Eindringvorgang teilweise kurzzeitig einbrach (Chipping), hierbei sich jedoch der Eindringweg weiter erhöhte. Im Anschluss stieg die Kraft wieder an. Dadurch kann es während eines Eindringvorganges des Bohrers in Beton zu mehreren Kraftmaxima kommen (siehe Abbildung 3.9 a). Vonnemann führte dieses Verhalten auf die Rissentstehung beim Zerspanvorgang zurück, wodurch es zu Abplatzungen kommt. Diese Erkenntnisse wurden von Hustrulid und Fairhurst (Hustrulid & Fairhurst, 1971a) sowie Pang und Goldsmith (Pang & Goldsmith, 1992) auch im Bereich der Gesteinsbohrung bestätigt (siehe Abbildung 3.9 b).

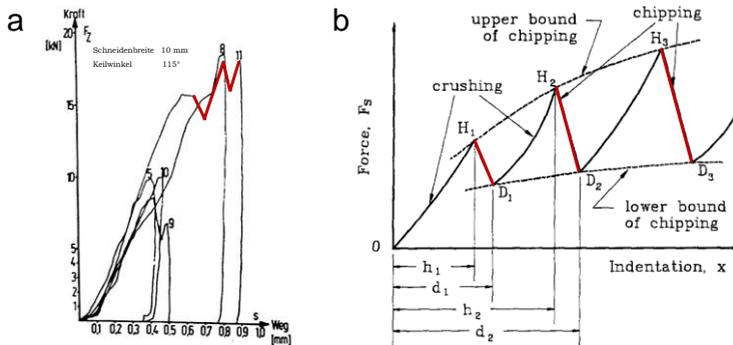


Abbildung 3.9: Gemessene Zerspankraftfunktionen zur Beschreibung des Verhaltens einer Metallspitze in Beton (links (Vonnemann, 1977)) bzw. Abbildung einer exemplarischen Zerspankraftfunktion in Gestein (rechts (Pang & Goldsmith, 1992)). In beiden Diagrammen ist das kurzzeitige Einbrechen der Kurven (Chipping) aufgrund von Rissentstehungen und Abplatzungen des Untergrundes zu erkennen (jeweils rot markiert).

Wie eingangs erwähnt kommt es im Bohrer zu Wellenreflexionen. Vonnemann (1977) konnte dies in seiner Studie, in der er DMS-Streifen an einem Bohrer befestigte, nachweisen. Er zeigte, dass bei dem untersuchten Setup, während einer

Schlagperiode des Bohrhammers, vier Reflektionen auftraten. Hecker (1983) und Burgert (2020) wiesen dies später ebenfalls anhand von Experimenten nach und analysierten diesen Effekt auf Basis von Simulationen. Anhand dieser Experimente zeigten sie, dass sobald die Welle auf das Bohrerende trifft, ein Teil der Energie übertragen sowie ein Teil reflektiert wird, wodurch eine Zugspannungswelle auftritt (siehe Abbildung 3.10). Zusätzlich zu dieser entstehenden Primärwelle wird eine zeitlich versetzte Druckwelle in das Werkzeug eingeleitet. Diese entsteht durch die Elastizität bzw. des Rückfederns des Betons (Gerade 2). Der Impuls dieser, von Hecker als Sekundärwelle bezeichnet, ist umso höher, je härter der Beton ist. Mit steigender Härte des Betons verkürzt sich jedoch gleichzeitig die Impulsdauer. Vergleichbar zu Vonnemann (1977) zeigte Hecker (1983), dass nach etwa viermaliger Reflektion der Primärwelle, diese nicht mehr stark genug ist, um den Untergrund zu zertrümmern. Beim Vergleich der Auswirkung der Impulse im Zerspankraftdiagramm (siehe Abbildung 3.11) wird deutlich, dass zu Beginn die Kraft nicht so hoch war wie bei den späteren Impulsen (Phasen), jedoch ein deutlich größerer Eindringweg erreicht wurde. Vonnemann erklärte dieses Verhalten damit, dass die Bohrerschneide während der Anfangsphase des Eindringvorgangs zunächst Bohrklein mit niedrigerem Widerstand verdrängen bzw. durchdringen musste und dann erst der Kontakt zum Bohrgrund erreicht wurde. Erst bei den folgenden Reflektionen wurde der für Einzelschläge charakteristische Eindringwiderstand erreicht.

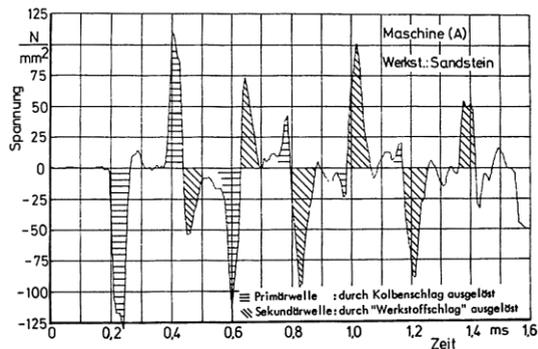


Abbildung 3.10: Von Hecker gemessener Spannungsverlauf in einer mit DMS-Streifen ausgestatteten Stange bei der Nutzung eines Bohrhammers (Hecker, 1983). Die Stange wurde als Ersatz für einen Bohrer eingesetzt, um DMS-Streifen befestigen zu können.

Zwar schreibt Vonnemann, dass die Drehbewegung des Bohrers in der Analyse eines Einzelschlages vernachlässigbar ist, diese Drehbewegung jedoch für Bohrmehlaborforderung zuständig ist und verändert somit den Anteil des Bohrmehls bzw. Bohrkleins an der Spitze. Des Weiteren sorgt die Drehbewegung einerseits dafür, dass die Schneidkante im Bohrlochgrund versetzt wird und dadurch nicht in die gleiche Kerbe schlägt. Andererseits wird durch sie das Bohrmehl mittels der Wendel aus dem Bohrloch entfernt. Wird dies nicht ausreichend erfüllt, steigt die Reibung zwischen Bohrer und Bohrloch bzw. Bohrmehl an. Dies hat zur Folge, dass das Lastmoment steigt, wodurch die Drehzahl des Bohrers bzw. des Motors abnimmt (Cronjäger & Jahn, 1985; Hecker, 1983). Wird das Bohrmehl im Bohrloch weiter verdichtet, kann dieses sogar ein Rückprallen des Bohrers verhindern (Gruner & Knoll, 2000). Dadurch befindet sich der Bohrhammer nicht mehr in einem effizienten Betriebspunkt.

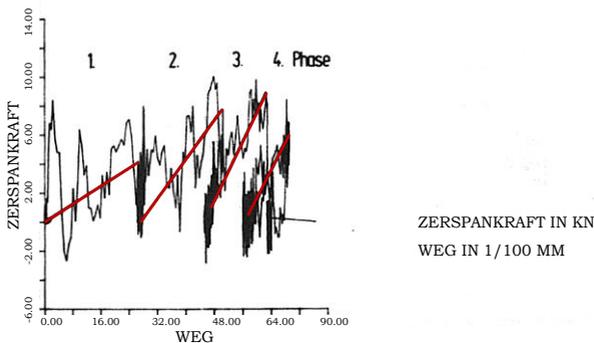


Abbildung 3.11: Zerspankraft über Eindringweg eines Bohrers über den Zeitraum von vier Wellenreflektionen (Phasen) innerhalb des Bohrers (Vonnemann, 1977). Die rote Linien markieren die mittlere Zerspankrafftunktion je Phase. Diese steigt bis zur 3. Phase an, da zunächst Bohrklein verdichtet bzw. zertrümmert werden muss.

Im Zuge der Analyse von Einflussgrößen auf die Messung der Schwingungsbelastung des Menschen hatten Cronjäger & Jahn (1985) auch den Einfluss des Untergrundes und hierbei insbesondere der Betonfestigkeit auf den Bohrfortschritt aufgezeigt. In dieser Studie konnten sie nachweisen, dass die Betonfestigkeit einen großen Einfluss auf die Vorschubgeschwindigkeit hat. Bei

einem Beton B15 mit einer Druckfestigkeit von  $15 \text{ N/mm}^2$  konnte eine Vorschubgeschwindigkeit von ca.  $3,3 \text{ mm/s}$  ( $20 \text{ cm/min}$ ) erreicht werden. Wurde die Betonfestigkeit erhöht, nahm die Vorschubgeschwindigkeit auf etwa  $2,5 \text{ mm/s}$  ( $15 \text{ cm/min}$ ) deutlich ab und bleibt bei einer weiteren Erhöhung auf B55 nahezu konstant. Im Zuge der von Cronjäger & Jahn durchgeführten Studie wurde weiterhin untersucht, ob  $a_{nv}$ -Wertuntersuchungen mit Hilfe von homogenen Untergründen reproduzierbarere Ergebnisse liefern. Hierbei konnte gezeigt werden, dass bei reinem Mörtel eine höhere und bei Naturstein wie Sandstein und Granit eine niedrigere Vorschubgeschwindigkeit auftrat.

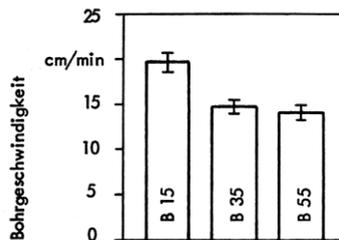


Abbildung 3.12: Einfluss der Betonfestigkeit auf die Vorschubgeschwindigkeit (Bohrgeschwindigkeit) in  $\text{cm/min}$  beim Hammerbohren auf Basis von Experimenten (Cronjäger & Jahn, 1985). Durch eine Erhöhung der Betonfestigkeit von B15 auf B35 nimmt die Vorschubgeschwindigkeit ab und bleibt bei einer Erhöhung auf B55 nahezu konstant.

### 3.2.4 Zwischenfazit

Zur Beschreibung der Produktivität werden im Stand der Forschung zwei Kenngrößen verwendet. Diese sind die Vorschubgeschwindigkeit sowie die kumulierten Bohrmeter je Arbeitstag unter Berücksichtigung der erlaubten Vibrationsexposition. Bei der Berechnung der kumulierten Bohrmeter je Arbeitstag muss insbesondere die Annahme von definierten Pausenzeiten während eines Tages getroffen werden. Dadurch werden mögliche Aussagen auf Basis von Untersuchungen unsicherer. Aufgrund dessen wird in dieser Arbeit die Vorschubgeschwindigkeit als Bewertungsgröße verwendet.

Im Stand der Forschung wurde weiterhin gezeigt, dass für die Vorschubgeschwindigkeit sowohl die Wellenausbreitung im Schlagwerk als auch in den Untergrund eine bedeutende Rolle spielen. Die Wellenausbreitung im Schlagwerk wird von Gestaltmerkmalen der technischen Systeme, jedoch auch durch die Eigenschaften des Untergrundes beeinflusst. Daraus lässt sich schließen, dass bei der Untersuchung des Einflusses der Querkraft auf die ROP die Interaktion der Querkraft mit der Betonfestigkeit sowie unterschiedlicher Bohrhämmer analysiert werden sollte. Weiterhin hat insbesondere die vom Anwender aufgebrauchte Andruckkraft einen starken Einfluss, da diese die Zustände der Schlagkomponenten zueinander beeinflusst. Eine Herausforderung in der Auslegung und Optimierung der technischen Systeme entsteht dadurch, dass die Faktoren sich gegenseitig beeinflussen.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass es bislang keine Untersuchungen zum Einfluss von Querkräften auf die Vorschubgeschwindigkeit gibt. Des Weiteren beeinflussen sich viele Faktoren gegenseitig, weshalb bei der Analyse des Einflusses der Querkraft immer weitere Faktoren und deren Interaktion mitberücksichtigt werden sollten.

### **3.3 Einflussgrößen auf die Belastung des Anwenders durch Vibrationen**

Im Bohrhammer entstehen durch den Antriebstrang Vibrationen (Hecker & Riederer, 1985), welche aufgrund der Ankopplung des Anwenders an das Gerät auf diesen übertragen werden (Kaulbars, 2006; Kaulbars & Lemerle, 2007). Aufgrund der Exposition des Menschen durch die Vibrationen kann es unter anderem zu vaskulären und nervalen Erkrankungen (Fridén, 2001; Goldsmith et al., 1994; Poole et al., 2019) im Bereich des Hand-Arm-Systems kommen. Kritisch hierbei ist, dass die Symptome und Schädigungen sich meist nur im Anfangsstadium zurückbilden können (Färkkilä, Aatola, Starck, Korhonen & Pyykkö, 1986). Wie stark diese Schädigungen bei gegebener Exposition ausgeprägt sind, ist bei jedem Menschen individuell. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass diese zeitabhängig sind und somit von der Expositionsdauer (Bovenzi, 1994; Zimmerman, Bain, Persson & Riley, 2017) sowie von der Frequenz der wirkenden Vibration abhängen (Krajnak et al., 2012). Hierbei sind insbesondere die Frequenzen kritisch, welche beim Menschen in den betroffenen Körperteilen auf eine Resonanzfrequenz treffen. Beim Hand-Arm-System entspricht dies einem Frequenzband von 10 – 20 Hz. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Schädigung durch Vibrationen, wurde ein Filter (siehe Abbildung 3.13) bzw. Bewertungsgröße entwickelt und in Normen überführt, welcher

die Schädigung des Menschen durch die Vibrationsbelastung über die Frequenz bewertet (DIN EN ISO 5349). Neben der Norm zur Berechnung der Bewertungsgröße, dem  $a_{hv}$ -Wert, wurden weitere Normen veröffentlicht, welche die Messmethode zur Bestimmung des  $a_{hv}$ -Wertes für unterschiedliche Power-Tools, unter anderem Bohrhämmer (DIN EN ISO 28927-10), definieren. Mit Hilfe des gemessenen  $a_{hv}$ -Wertes sowie einer Grenzwerttabelle (DIN CEN/TR 15350) kann die maximale Dauer für die Nutzung eines Power-Tools pro Tag bestimmt und bewertet werden, sodass keine Gefahr für den Menschen entsteht. Die Bewertung beruht auf Untersuchungen, in denen erforscht wurde, nach wie vielen Jahren 10 % der Probanden Schädigungen davongetragen hatten. Im Stand der Forschung gibt es diverse Studien, in welchen die Einflüsse auf den  $a_{hv}$ -Wert beim Hammerbohren untersucht wurden. Entsprechend dem Unterkapitel 2.3, werden diese Einflussgrößen erneut nach dem XiL-Ansatz aufgeteilt und im Folgenden diskutiert.

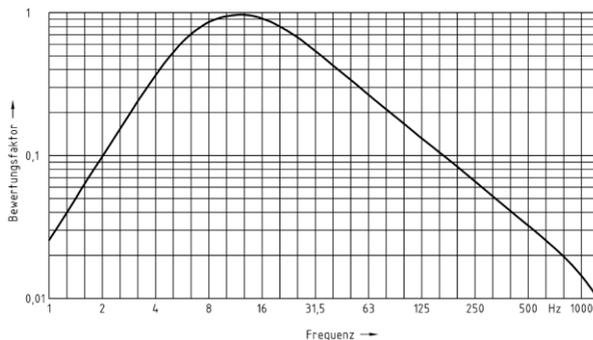


Abbildung 3.13: Filterverlauf zur Bewertung der zwischen Anwender und Power-Tool gemessenen Vibrationen hinsichtlich menschlicher Schädigung (DIN EN ISO 5349)

### 3.3.1 Einfluss des Anwenders

Aufgrund der Bemühungen den Menschen vor Krankheiten zu schützen, welche durch Vibrationen hervorgerufen werden, wurden umfangreiche Untersuchungen über den Einfluss des Menschen auf die Schwingungsexposition durchgeführt. Auf Basis der Studien konnte nachgewiesen werden, dass die Konstitution des

Anwenders die Impedanz dessen und dadurch die  $a_{hv}$ -Werte beeinflusst (Mangold, 2019; Matthiesen, Mangold & Bruchmueller, 2018). Weiter spielt ebenso die Körper- bzw. Armhaltung des Anwenders bei der Vibrationsbetrachtung eine Rolle (Matthiesen, Mangold & Bruchmueller, 2018). Jahn (1985) wies nach, dass beim vertikalen nach unten Bohren die Vibrationswerte 20 % höher sind als beim horizontalen Bohren. In der Studie wurde hierbei darauf geachtet, dass bei beiden Faktorstufen die gleiche Vorschubkraft, also die Kraft zwischen Bohrer und Untergrund, gewirkt hat. In einer späteren Studie von Schenk & Knoll (1998) konnte dieses Vibrationsverhalten bestätigt werden. Bei diesen Versuchen wurde jedoch die Andruckkraft konstant gelassen. Verändert sich die Armhaltung beim horizontalen Bohren aufgrund des Abstandes der Bohrung zum Boden, resultiert dies ebenfalls in einer Veränderung der Vibrationen (Mangold, 2019; Matthiesen, Mangold & Bruchmueller, 2018).

Neben der Konstitution sowie Körperhaltung des Anwenders beeinflussen die Anwenderkräfte die Bohrhammervibrationen. Durch die Erhöhung der Andruckkraft nimmt die Impedanz zu und somit die Verschiebungsbeweglichkeit des Bohrhammers ab (Cronjäger et al., 1984). Dies resultiert aus dem Versteifen des Hand-Arm-Systems. Marcotte et al. (2010) wiesen in einem shakerbasierten Experiment nach, dass die Andruckkraft den Betrag der scheinbaren Masse nur in dem Bereich zwischen 20 und 200 Hz verändert. Neben der Beeinflussung der Impedanz des Menschen, wirkt sich eine Variation der Vorschubkraft auch auf die Randbedingungen am Bohrhammer aus. So wird dieser stärker an den Beton angedrückt. Hierdurch ändert sich die Charakteristik des Stoßkontaktes zwischen Beton und Bohrer (Bruchmueller, Huegel, Wacker & Matthiesen, 2019), wodurch die Energieübertragung der beiden Stoßpartner beeinflusst wird (Vonnemann, 1977). Am Bohrhammer selbst kann sich das Verhalten des Schlagwerkes ändern. Schäfer (2018) beschreibt, dass es bei niedrigen Vorschubkräften zu Doppelprellern kommen kann. Hierbei treffen Zwischenkolben und Werkzeug mehrmals aufeinander. Bei höheren Vorschubkräften können dagegen alternierend ausgeprägte Schläge hervorgerufen werden (Schäfer, 2018). Das grundsätzliche Auftreten der Doppelschläge sowie der alternierenden Schläge wurden bereits von Riederer (1985) beschrieben. Bei schwingungsentkoppelten Bohrhammergriffen hat die Vorschubkraft einen Einfluss auf den Grad der Stauchung der für die Schwingungsentkopplung verantwortlichen Feder- bzw. Dämpferelementen.

In mehreren Studien wurde der Zusammenhang zwischen der Andruckkraft bzw. Vorschubkraft und den Bohrhammervibrationen erforscht. In einem Experiment von Jahn sowie Cronjäger & Jahn (Cronjäger & Jahn, 1985; Jahn, 1985) variierten Probanden die Andruckkraft von 60 bis 200 N. Durch eine Erhöhung der Kraft fällt der  $a_{hv}$ -Wert ab, wobei bei 60 N laut den Autoren kein stabiler Betriebspunkt vorlag.

Die Abnahme der Vibrationen wurde mit dem Versteifen und der stärkeren Ankopplung des Hand-Arm-Systems an den Bohrhämmer erklärt. Eine Verringerung des  $a_{hv}$ -Wertes aufgrund der Steigerung der Vorschubkraft, wird für einen Bohrhämmer von Bosch auch von Schenk & Knoll (1998) festgehalten. Für einen Bohrhämmer von Elu weist er jedoch nach, dass bei einem Bohrerdurchmesser von 18 mm die Vibrationswerte zunächst ansteigen und anschließend abfallen. Wurde ein Bohrerdurchmesser von 40 mm verwendet, stiegen die Vibrationswerte über alle Vorschubkräfte hinweg an. Ein Anstieg der  $a_{hv}$ -Werte durch die Vorschubkräfte konnte ebenfalls von Mangold (2019) und Mangold et al. (2018) sowie Botti et al. (2020) aufgezeigt (siehe Abbildung 3.14) werden. Botti et al. konnten zusätzlich einen Hochpunkt bei einer Vorschubkraft von 167 N in ihren Versuchsdaten nachweisen. Der Zusammenhang der Andruckkraft mit den Gehäusevibrationen scheint somit stark systemabhängig zu sein. In allen vorgestellten Untersuchungen wurden nur Kräfte in Vorschubrichtung aufgebracht und somit keine Querkräfte.

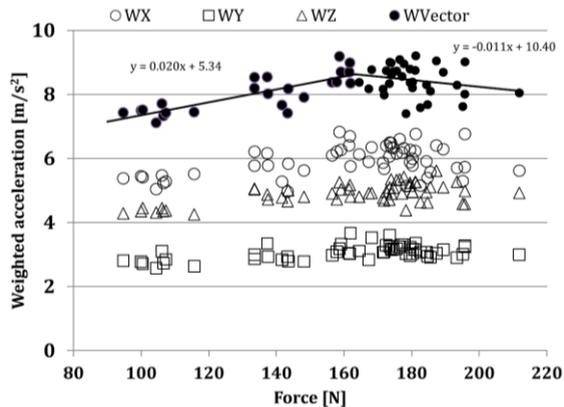


Abbildung 3.14: Zusammenhang der Vorschubkraft und des  $a_{hv}$ -Wertes für das untersuchte System TE 70 von Hilti mit einem Wendelbohrer (Botti et al., 2020). Die Ergebnisse wurden auf einem Prüfstand erzeugt.

Neben der Vorschubkraft beeinflusst die Greifkraft die Impedanz des Menschen indem durch eine Erhöhung der Greifkraft das Hand-Arm-System versteift wird. Jahn (1985) zeigte, dass der Einfluss der Greifkraft insbesondere bis zu einer Frequenz von 100 Hz zunimmt. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen ebenso Gurram,

Rakhejy & Gouw (1995) sowie Burström (1990; 1997). Sie zeigten, dass durch eine Reduktion der Greifkraft der Betrag der Impedanz im Bereich bis 100 Hz erniedrigt wird. Auch konnte gezeigt werden, dass die Phase der Impedanz durch die Greifkraft weniger stark beeinflusst wird als durch die Andruckkraft. Diese Erkenntnisse spiegeln sich in den Ergebnissen von Jahn (1985) und Mangold et al. (2018) wieder. Sie zeigten beide anhand von manuellen Probandenstudien, dass sich die  $a_{hv}$ -Werte verringern, wenn die Greifkräfte erhöht werden.

### 3.3.2 Einfluss des technischen Systems

In diesem Unterkapitel werden zunächst die im Stand der Forschung bekannten Einflüsse von Bohrhämmern und anschließend der Bohrer auf die Bohrhammervibrationen beschrieben. Die Studien von Riederer (1985), Schenk & Knoll (1998) und Rempel et al. (2019) zeigten, dass unterschiedliche Bohrhammertypen den  $a_{hv}$ -Wert beeinflussen. Um zu verstehen wodurch diese Unterschiede entstehen, wurden insbesondere in den 1980er und 90er Jahren diverse Studien durchgeführt, bei denen der Einfluss einzelner Parameter des Bohrhammers analysiert wurden. Neben einer Untersuchung zur Auswirkung von Fertigungstoleranzen (Schenk & Gillmeister, 1999), wurden verstärkt der Einfluss von schlagwerksspezifischen Größen sowie von unterschiedlichen Konzepten zur Schwingungsminderung erforscht. Bei der Betrachtung des Schlagwerkes sind alle Ereignisse zu berücksichtigen, bei denen Kräfte entstehen, welche ins Gehäuse geleitet werden. Riederer (1985) zeigt (siehe Abbildung 3.15), dass durch die Massenkkräfte des Antriebskolbens sowie durch die Kompression der Luftfeder (von Riederer als LF und im weiteren Dokument mit SA bezeichnet) es zu eindeutigen Beschleunigungen am Gehäuse kommt. Die sinusförmige Schwingung mit ca. 45 Hz durch den Antriebskolben ist im Beschleunigungssignal in der Abbildung nahezu zeitsynchron zu seinem Weg zu erkennen. Aufgrund dessen wurden in diesem Zuge weitere Parameter wie die Luftfederlänge und -durchmesser, die Antriebskolbenmasse, der Kurbelradius (Hecker & Riederer, 1985; Riederer, 1985) sowie die Schlagwerkstemperatur (Cronjäger & Jahn, 1985) betrachtet.

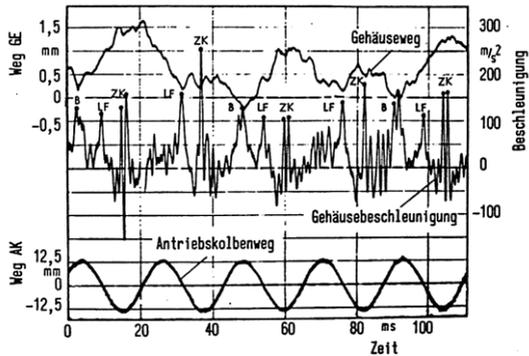


Abbildung 3.15: Abbildung des Antriebskolbenwegs (AK), Gehäusewegs (GE) und der Gehäusebeschleunigung über vier Schlagzyklen eines von Riederer untersuchten Bohrhammers (Riederer, 1985). Der B-Schlag (B) im Gehäusebeschleunigung entsteht durch das Auftreffen des Gehäuses auf den Schlagbolzen, LF durch die Kompression der Luftfeder und ZK durch den Mehrfachschlag des Zwischenkolbens.

Um wenig mechanische Energie in das Gehäuse zu leiten, ist es wichtig, dass die Übertragung von einem Stoßkörper zum anderen möglichst verlustarm funktioniert. Deshalb sollten wenig Komponenten für die Impulsübertragung eingesetzt werden (Riederer, 1985). Weitere Einflussgrößen bezüglich der Impulsübertragung sind die Schlagkolbenmasse, der Durchmesser (Hecker & Riederer, 1985; Riederer, 1985) sowie die Gestalt des Schlagkolbens (Hecker, 1983). Bezüglich der Gestalt des Schlagkolbens sind insbesondere die Durchmesseränderungen sowie die Stoßflächen entscheidend. Hecker analysierte das Verhalten einer kugelförmigen gegenüber einer flachen Stoßstelle. Das Massenverhältnis vom Zwischenkolben zum Schlagkolben ist im Zuge der Vibrationsbelastung ebenfalls zu berücksichtigen. Ist der Zwischenkolben leichter, kommt es vermehrt zu Doppelprellern (ZK in Abbildung 3.15). Diese Schläge entstehen dadurch, dass der Zwischenkolben mehrfach zwischen Werkzeug und Schlagkolben oder dem Dämpfungselement hin und her prallt. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, ist eine Mindestdruckkraft notwendig, damit durch die im Bohrhammer entstehenden Trägheitskräfte der Bohrhammer nicht zu stark vom Untergrund abhebt. Setzt der Bohrhammer bzw. dessen Gehäuse durch die aufgebrauchte Andruckkraft auf den Zwischenkolben auf, kommt es zu dem in Abbildung 3.15 zu sehenden B-Schlag. Dieser wird stark durch das Dämpfungselement geprägt, welches sich zwischen Gehäuse und Zwischenkolben befindet (Riederer, 1985).

Um den Anwender vor zu hohen Vibrationen zu schützen, wurden viele Untersuchungen im Bereich Schwingungsreduktion von Bohrhämmern durchgeführt. Neben Handschuhen zur Dämpfung der Vibrationen (Hamouda, Rakheja, Dewangan & Marcotte, 2018), welche sich sogar negativ auswirken können, wurden an Schwingungstilgern (Gillmeister, 1998; Golyшева et al., 2004) sowie an Konzepten zur Schwingungsentkopplung (Gillmeister, 1997, 1998; Hecker & Riederer, 1985; Oddo et al., 2004; Riederer, 1985) geforscht. Zwar sind heutzutage alle übergeordneten Lösungsansätze in kommerziellen Bohrhämmern zu finden, jedoch haben sich insbesondere schwingungsentkoppelte Systeme durchgesetzt. Hecker und Riederer (1985) konnten zeigen, dass beispielsweise durch eine federbasierte Schwingungsentkopplung mit einem Drehgelenk an der unteren Griffankopplung die Vibrationsbelastung um über 50 % reduziert werden konnte.

Neben dem Bohrhammer hat ebenso der Bohrer einen Einfluss auf die Gehäusevibrationen. In veröffentlichten Studien wurde dabei insbesondere die Bohrerform betrachtet. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine größere Bohrerlänge zu niedrigeren Vibrationswerten (Cronjäger & Jahn, 1985) führt. Anhand eines Experiments von Schenk (1997) bei dem die Bohrerform sowie der Durchmesser variiert wurden, wies er deren Einfluss nach. Weiter kam er zum Schluss, dass der  $a_{hv}$ -Wert umso größer ist, je kleiner die Schneidkantenlänge ist. Anhand seiner Ergebnisse wird ebenso deutlich, dass durch eine Erhöhung des mittleren Zerspanvolumens, und somit der Vorschubgeschwindigkeit, der  $a_{hv}$ -Wert ebenfalls steigt. Eine Untersuchung von Vonnemann (1977) zeigte jedoch ein gegensätzliches Verhalten. In seinem Experiment fiel der  $a_{hv}$ -Wert mit steigender Vorschubgeschwindigkeit ab. Vonnemann begründete dies damit, dass hierdurch möglichst viel Energie in den Untergrund geleitet wird. Dies lässt den Schluss zu, dass auch der Verschleiß der Bohrerschneide einen Einfluss haben könnte. In Studien von Cronjäger & Jahn (1985) sowie Jahn (1985) konnte gezeigt werden, dass die  $a_{hv}$ -Werte bei verschlissenen bzw. stumpfen Bohrern um 23 % abgesunken waren. Nach Jahn (1985) entsteht bei Bohrern mit scharfer Schneide eine geringere Rückprallgeschwindigkeit des Bohrers als mit stumpfer Schneide. Hierdurch werden der Zwischenkolben und letztendlich der Schlagkolben weniger stark angestoßen. Durch die niedrigere Geschwindigkeit des Schlagkolbens muss dieser jedoch stärker durch den Antriebskolben angesaugt werden. Dadurch kommt es bei scharfen (nicht verschlissenen) Bohrern zu größeren Kraftspitzen und somit höheren Beschleunigungswerten. Bei neueren Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass der  $a_{hv}$ -Wert über die kumulierten Bohrmeter bzw. den Verschleiß zunächst ansteigt und später wieder leicht abnimmt (Antonucci et al., 2017; Rempel, Antonucci et al., 2017).

### 3.3.3 Einfluss des Untergrundes

Bei der Betrachtung des Einflusses des Untergrundes auf die Gehäusevibration ist es entscheidend, wie viel der vom Bohrhämmer aufgebrauchten Schlagenergie vom Untergrund wieder in das Schlagwerk und letztendlich in das Bohrhämmergehäuse zurückgeführt wird. Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben wird ein Teil der Welle am Bohrer reflektiert und zusätzlich durch die Elastizität des Untergrundes in Form der Sekundärwelle zurück in den Bohrer geleitet. Welche Restenergie sich noch im Bohrer befindet, hängt dabei von der Bohrerform, aber auch stark von den Bedingungen an der Schneide ab. Befindet sich diese nicht oder nur geringfügig in Kontakt mit dem Untergrund, was stark durch die Vorschubkraft beeinflusst wird, bzw. ist viel Bohrmehl vorhanden, werden größere Anteile der Primärwelle reflektiert (Hecker, 1983; Vonnemann, 1977). Dies führt zu höheren Beschleunigungen am Gehäuse. Bei einem härteren Untergrundwerkstoff wird mehr Energie in den Untergrund geführt und somit die Amplitude des Impulses der Primärwelle und letztendlich die Gehäusebeschleunigung reduziert. Wohingegen der Impuls der Sekundärwelle je kleiner und länger wird, desto elastischer der Beton ist. Befindet sich der Zwischenkolben in Kontakt mit dem Bohrer, werden Teile der reflektierten Primär- und Sekundärwelle in den Zwischenkolben (Vonnemann, 1977) und entweder über das Dämpfungselement oder das Schlagwerk letztendlich auf das Bohrhämmergehäuse übertragen. Hierdurch wird dieses in Schwingungen versetzt. Die Folgen dieses Verhaltens werden in der Studie von Cronjäger & Jahn (1985) und Jahn (1985) deutlich. In ihren Studien zeigten sie, dass der Beton B15, welcher eine niedrigere Druckfestigkeit besitzt als B35 und B55, 6 % höhere  $a_{hV}$ -Werte erzeugt. Jedoch konnte in Ihrer Studie kein signifikanter Unterschied zwischen den Betonarten B35 und B55 nachgewiesen werden. Beim Vergleich von Beton (B35) mit den härteren Natursteinen bestätigte sich der Einfluss von höherfestem Material wieder. Durch das Bohren in Sandstein verringerte sich der  $a_{hV}$ -Wert um 7 % und bei Granit um 11 %.

### 3.3.4 Zwischenfazit

Die Impedanz des Menschen beeinflusst die Bohrhämmer-Vibrationen und sollte deshalb bei Untersuchungen auf Prüfständen berücksichtigt werden. Bei einer Erhöhung der Andruckkraft versteift sich das Hand-Arm-System bzw. erhöht sich die Impedanz. Bezüglich des Einflusses der Andruckkraft auf den  $a_{hV}$ -Wert stimmen die Ergebnisse des Bohrhammers von Bosch von Schenk & Knoll (1998) mit Jahn (1985) überein. Das Ansteigen der Vibrationen bei dem Bohrhämmer von Elu könnte mit einem instabilen Zustand aufgrund einer zu niedrigen Andruckkraft begründet werden. Warum bei einem sehr großen Durchmesser jedoch die Vibrationen stetig

zunehmen stimmt nicht mit anderen Ergebnissen bzw. der Erklärung von Jahn überein. Daraus kann geschlossen werden, dass hierbei noch unbekannte Interaktionseffekte vorliegen. Die Greifkräfte haben einen geringfügigen Einfluss und beeinflussen hauptsächlich die Übertragung zum Menschen und weniger die Schlagwerkszustände. Deshalb müssen diese in Experimenten berücksichtigt bzw. lediglich konstant gehalten werden. Querkkräfte, welche senkrecht zur Vorschubrichtung wirken, wurden bislang in Untersuchungen von Einflussgrößen auf den  $a_{hv}$ -Wert nicht berücksichtigt.

Bei der Analyse des Einflusses von Bohrhämmern auf die entstehenden Bohrhammervibrationen konnte gezeigt werden, dass im Wesentlichen das Stoßverhalten des Schlagkolbens und die Bedingungen an der Schneide die Energieübertragung bestimmen. Dieses Verhalten wird stark durch das Massenverhältnis der Stoßkomponenten, bestehend aus Zwischenkolben und Schlagkolben, sowie des Bohrers geprägt. Einen sehr großen Einfluss haben auch die Maßnahmen zur Schwingungsreduzierung im Bohrhämmer. Bezüglich des Bohrers wird deutlich, dass unterschiedliche Bohrerdurchmesser sowie der Bohrerverschleiß einen Einfluss haben. Die unterschiedlichen Ergebnisse der Studien zur Analyse des Bohrerverschleißes auf den  $a_{hv}$ -Wert lassen den Schluss zu, dass es in den Studien noch unbekannte Parameter gibt, welche bislang noch nicht berücksichtigt wurden.

Der Nachweis des Einflusses von Beton auf den  $a_{hv}$ -Wert wurde bereits erbracht. Dabei führen insbesondere die Betonfestigkeit sowie die Menge an im Bohrloch befindlichen Bohrmehls zu einer Veränderung des  $a_{hv}$ -Wertes. Eine höhere Betonfestigkeit führt zu niedrigeren Vibrationen.

Die Übertragung der Energie an das Gehäuse hängt von den Wechselwirkungen aus Andruckkraft, Betonfestigkeit, sowie der Gestaltmerkmale der Stoßkomponenten ab. Hierdurch kommt es zu Interaktionseffekten zwischen den Teilsystemen, welche die Gehäusevibration beeinflusst.

Anhand des aktuellen Stands der Forschung, bezogen auf die Analyse von Einflussgrößen auf die Bohrhammervibration, kann folgendes geschlossen werden: Der Einfluss von Querkräften wurde bislang nicht untersucht. Sowohl der Beton, der Anwender durch seine Schwingungseigenschaften und Andruckkraft, als auch das technische System haben einen Einfluss. Da diese sich gegenseitig beeinflussen, sollten sie auf Prüfständen gezielt eingestellt und variiert werden. Erst dadurch können Interaktionseffekte mit der Querkraft ermittelt werden.

## 4 Konkretisierung der Zielstellung und des Forschungsdesigns

### 4.1 Motivation und Zielstellung

Für die Bewertung der Ergonomie eines Bohrhammers sind die Belastung des Anwenders (Bovenzi, 1994; Fridén, 2001) sowie die Arbeitsproduktivität (Looze et al., 2001) wichtige Kriterien. Anhand des aktuellen Stands der Forschung konnte gezeigt werden, dass der  $a_{hv}$ -Wert eine Größe zur Beschreibung der Belastung des Anwenders durch die Bohrhammervibrationen darstellt. Die Arbeitsproduktivität beeinflusst unter anderem wie lange ein Anwender Belastungen ausgesetzt ist und wie wirtschaftlich ein Bohrhämmer ist. Sie wird im wissenschaftlichen Umfeld von Bohrhämmern zumeist in Form der Vorschubgeschwindigkeit beschrieben. Es konnte bereits gezeigt werden, dass diverse Parameter die beiden Größen beeinflussen. Neben der Andruckkraft, welche einen Einfluss auf die Vorschubgeschwindigkeit und den  $a_{hv}$ -Wert hat, erzeugen Anwender Querbewegungen (Momeni et al., 2017). Es ist jedoch unbekannt, in welcher Größenordnung professionelle Anwender durch diese Querbewegungen Querkräfte während des Bohrprozesses aufbringen. Im Stand der Forschung ist beschrieben, dass ein ungenau ausgerichteter Bohrer auf einem Prüfstand, die  $a_{hv}$ -Werte beeinflussen kann (Cronjäger et al., 1984). Wie hoch die dabei entstehenden Querkräfte sein müssen, um das Ergebnis zu verändern, wurde bislang nicht untersucht. Die bisherigen Untersuchungen zur Analyse von Faktoren auf den  $a_{hv}$ -Wert und die Vorschubgeschwindigkeit haben gezeigt, dass es eine Vielzahl an Einflussgrößen gibt. Dabei kommt insbesondere der Energieübertragung der Stoßkomponenten eine wichtige Rolle zu. Größen wie die Vorschubkraft, die Ausprägung der Schlagwerkskomponenten, der Bohrerzustand oder der Bohreruntergrundkontakt beeinflussen die Übertragung. Hierbei kann es zu Interaktionseffekten zwischen den Einflussgrößen kommen. Somit ergibt es zumeist keinen Sinn, einen Einfluss eines Parameters entkoppelt zu betrachten. Zusammenfassend zeigt der Stand der Forschung, dass das Wissen fehlt, welche Größenordnung die vom Anwender aufgebrachten Querkräfte haben und welche Zusammenhänge mit den beiden Bewertungsgrößen  $a_{hv}$ -Wert und Vorschubgeschwindigkeit bestehen. Weiter konnte gezeigt werden, dass zwischen den Teilsystemen Anwender, technisches System und Untergrund Interaktionseffekte hinsichtlich der Bewertungsgrößen entstehen. Aufgrund dessen sollten Zusammenhänge der Querkraft mit den beiden Bewertungsgrößen nicht entkoppelt erforscht werden.

Aus der Lücke im Stand der Forschung lässt sich das Ziel dieser Arbeit ableiten. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erforschung der Zusammenhänge der vom Anwender aufbrachten Querkraft in Interaktion mit bekannten Einflussgrößen und für die Belastung des Anwenders relevanten Größen wie der Vorschubgeschwindigkeit sowie des  $a_{HV}$ -Wertes. Dieses Wissen hilft beispielsweise Entwicklern die Schwingungscharakteristik von Bohrhämmern zu analysieren sowie die Gestalt von Bohrern auf realitätsnähere Belastungen auslegen zu können. Weiterhin befähigt es Versuchsingenieure zu entscheiden, ob Querkräfte im Testing berücksichtigt werden müssen. Durch die beschriebenen Aspekte ist es möglich, die Ergonomie der Produkte zu erhöhen. Das beschriebene Ziel wird in die folgende übergeordnete Forschungsfrage überführt:

*Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Querkraft und den Größen Vorschubgeschwindigkeit sowie  $a_{HV}$ -Wert beim Hammerbohren unter Berücksichtigung bekannter Einflussgrößen?*

## 4.2 Forschungsdesign

Zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage, werden vier Studien durchgeführt. Zunächst wird anhand einer explorativen Studie analysiert, welche Größenordnung die von professionellen Anwendern aufbrachten Querkräfte besitzen. Zusätzlich wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Auf Basis dieser kann eine erste Annahme über den Einfluss der Querkraft auf die ROP und den  $a_{HV}$ -Wert abgeleitet werden (siehe Abbildung 4.1: Korrelationsanalyse). Die explorative Studie wird in eine Vor- und Hauptstudie unterteilt.

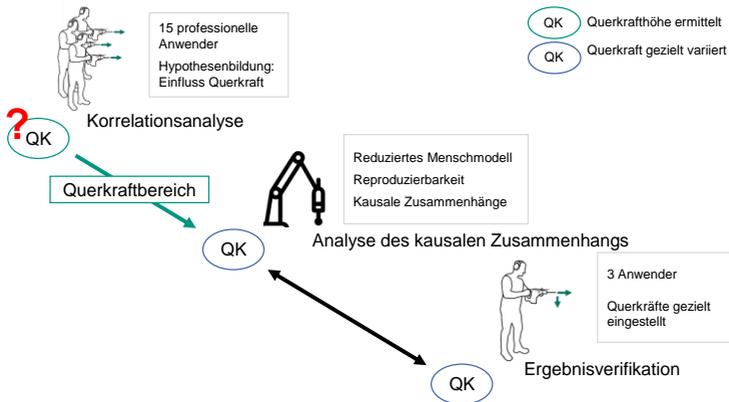


Abbildung 4.1: Forschungsdesign der vorliegenden Arbeit zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage welchen Einfluss die Querkraft auf den Hammerbohrprozess hat.

Im nächsten Schritt wird mithilfe von zwei kausalen Studien auf einem Prüfstand der Zusammenhang zwischen der Querkraft sowie dem  $a_{HV}$ -Wert und der ROP untersucht (siehe Abbildung 4.1: Analyse des kausalen Zusammenhangs). Hierbei werden die Größen Vorschubkraft, Bohrhammer, Bohrertyp, kumulierte Bohrmeter sowie Betonfestigkeit als weitere Faktoren berücksichtigt. Dadurch können Interaktionseffekte dieser Faktoren mit der Querkraft nachgewiesen und somit eine gewisse Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf unterschiedliche Systeme und Randbedingungen gewährleistet werden. Abschließend findet eine Verifikation der am Prüfstand ermittelten Ergebnisse statt, indem diese mit Ergebnissen aus Versuchen mit manuellem Hammerbohren (siehe Abbildung 4.1: Ergebnisverifikation) verglichen werden. Durch diese Verifikationsstudie ist es möglich eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den prüfstandbasierten Experimenten bezüglich des Einflusses der Querkraft auf das manuelle Hammerbohren aufzuzeigen. Weiterhin sollen auf Basis der Ergebnisse der Verifikation Anforderungen an zukünftige Versuchsumgebungen zur Untersuchung des Querkräfteinflusses abgeleitet werden. Nachfolgend ist das Forschungsdesign zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage genauer beschrieben sowie in Abbildung 4.2 veranschaulicht.

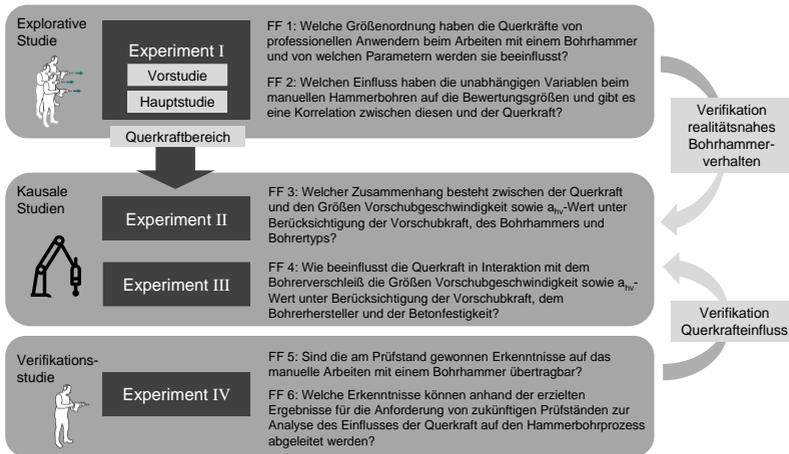


Abbildung 4.2: Darstellung der durchgeführten Studien mit zugehörigen Forschungsfragen dieser Arbeit

In der **explorativen Studie** wird einerseits das Ziel verfolgt, auf Basis einer Korrelationsanalyse Annahmen zu dem Einfluss der Querkraft auf den  $a_{HV}$ -Wert sowie die ROP abzuleiten und andererseits die Höhe der Querkräfte zu bestimmen, welche professionelle Anwender beim Hammerbohren aufbringen. Um die dafür notwendige Messmethode zu überprüfen und zur Analyse, ob beim Hammerbohren überhaupt Querkräfte auftreten, wird eine Vorstudie mit drei Probanden durchgeführt. In der eigentlichen Hauptstudie (Abbildung 4.3) haben 15 Probanden, welche in ihrer beruflichen Tätigkeit regelmäßig Bohrhämmer verwenden, die Vorgabe während den Versuchen drei Vorschubkraftlevel aufzubringen. Neben den Vorschubkräften werden die Bohrrichtung sowie der Bohrer variiert. Durch diese Vorgaben kann analysiert werden, ob die Querkraft von einem dieser Faktoren abhängt und dadurch ein besseres Verständnis für die Querkräfte erlangt werden. Zusätzlich zur Querkraft wurden die Größen Vorschubgeschwindigkeit, Gehäusebeschleunigung und Schlagfrequenz bestimmt. Dies ermöglicht einerseits Korrelationen zwischen der Querkraft und den Bewertungsgrößen zu bestimmen. Andererseits ermöglicht die Ermittlung der drei Größen einen Vergleich der Ergebnisse, welche nachfolgend auf einem Prüfstand erzielt werden, mit denen aus den manuellen Versuchen. Dies ist notwendig, da aus dem Stand der Forschung bekannt ist, dass je nach Wahl des Bohrhämmer-Bohrer-Setups es zu

unterschiedlichen Vibrationen und Vorschubgeschwindigkeiten führen kann. Somit müssen die Einflüsse und das Verhalten bezogen auf die Bewertungsgrößen für das spezifische Setup ermittelt werden. Im Gegensatz zur Verifikationsstudie können in der Hauptstudie keine kausalen Zusammenhänge der Querkraft mit den Bewertungsgrößen ROP und  $a_{HV}$ -Wert ermittelt werden. In der explorativen Studie sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

*FF 1: Wie groß sind die Querkräfte von professionellen Anwendern beim Arbeiten mit einem Bohrhämmer und von welchen Parametern werden sie beeinflusst?*

*FF 2: Welchen Einfluss haben die unabhängigen Variablen beim manuellen Hammerbohren auf die Bewertungsgrößen ROP und  $a_{HV}$ -Wert und gibt es eine Korrelation zwischen diesen und der Querkraft?*

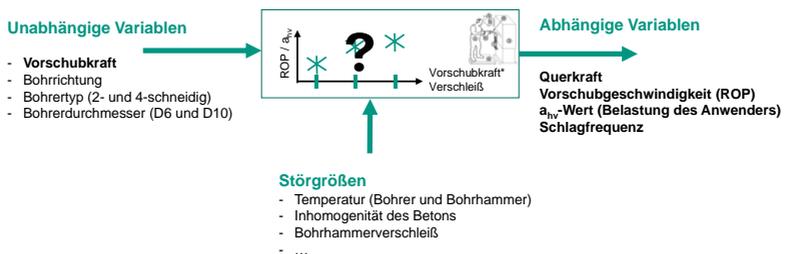


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung des Versuchsdesigns der explorativen Studie

Die **kausale Studie I** (siehe Abbildung 4.4) dient zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Querkraft und der Vorschubgeschwindigkeit sowie der Bohrhämmervibration. Hierbei werden mehrere Faktorstufen eingestellt, um einen Zusammenhang mit mehreren Stützstellen zu ermitteln. Als weitere Faktoren zur Analyse von Interaktionseffekten werden die Größen Vorschubkraft, Bohrhämmermodell sowie Bohrertyp untersucht. Das Experiment wird auf einem Prüfstand mit realen Betonproben durchgeführt. Die Vorschub- und Querkraft des Anwenders werden durch einen kraftgeregelten Roboter aufgebracht. Die Schwingungseigenschaften des Anwenders werden mithilfe des von Cronjäger et al. (1984) erforschten HAM abgebildet. Anhand der Studie wird folgende Forschungsfrage untersucht:

FF 3: Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Querkraft und der Vorschubgeschwindigkeit sowie dem  $a_{HV}$ -Wert unter Berücksichtigung der Vorschubkraft, des Bohrhammers und Bohrertyps?

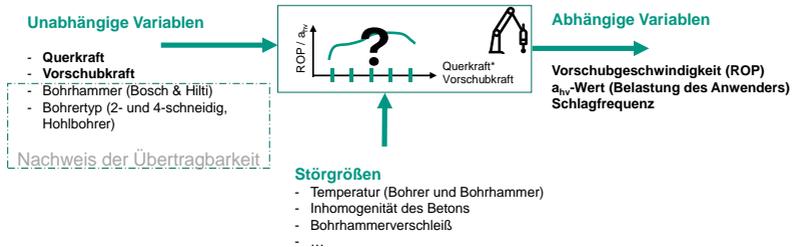


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des Versuchsdesigns der kausalen Studie I

In der **kausalen Studie II** wird untersucht, welchen Einfluss die Querkraft auf die Vorschubgeschwindigkeit und die Gehäusevibration unter Berücksichtigung der Betonfestigkeit und insbesondere des Bohrerverschleißes hat (siehe Abbildung 4.5). Bei der Studie wird die gleiche Versuchsumgebung wie im vorangegangenen Experiment verwendet. Als unabhängige Variablen werden neben der Querkraft, die Vorschubkraft, der Bohrerhersteller, die Betonfestigkeit sowie die kumulierten Bohrmeter eingestellt. Die kumulierten Bohrmeter korrelieren stark mit dem Bohrerverschleiß. Um diesen bewerten zu können, werden geometrische Größen des Bohrers vor, nach der Hälfte und zum Ende des Experimentes vermessen. Der Hauptfokus bei der Auswertung des Experiments liegt wiederum auf der Analyse der abhängigen Variablen Vorschubgeschwindigkeit, Gehäusevibration und Schlagfrequenz. Im Experiment werden bis auf die kumulierten Bohrmeter für alle untersuchten Faktoren lediglich Extremwerte eingestellt. Anhand der Studie wird folgende Forschungsfrage beantwortet:

FF 4: Wie beeinflusst die Querkraft in Interaktion mit dem Bohrerverschleiß die Vorschubgeschwindigkeit sowie den  $a_{HV}$ -Wert unter Berücksichtigung der Vorschubkraft, den kumulierten Bohrmeter und der Betonfestigkeit?

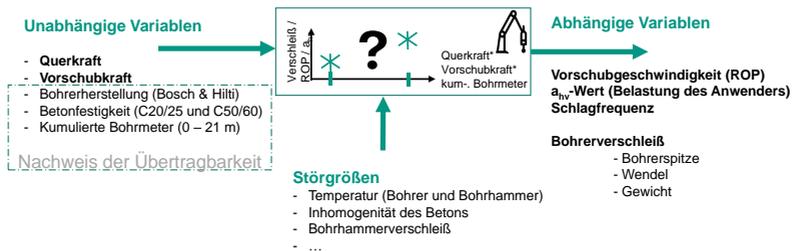


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des Versuchsdesigns der kausalen Studie II

Mittels der abschließenden **Verifikationsstudie** wird verifiziert, ob eine Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse der durchgeführten kausalen Studien auf das manuelle Hammerbohren möglich ist. Im Gegensatz zu den bereits durchgeführten manuellen Versuchen (explorative Studie), wird nun die Querkraft vorgegeben und gezielt variiert. Hierbei werden drei Probanden Extremwerte der Querkraft aus den vorangegangenen Experimenten vorgegeben und erneut die Größen Vorschubgeschwindigkeit und Gehäusebeschleunigung gemessen. Bei dem Vergleich der Ergebnisse werden zusätzlich die Daten und Ergebnisse aus der explorativen Studie herangezogen. Ein weiteres Ziel des Experiments ist das Ableiten von Anforderungen an zukünftige Prüfstände. Diese werden durch die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Vergleich von manuellen und automatisierten Versuchen ermittelt. Durch das beschriebene Vorgehen sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

*FF 5: Sind die am Prüfstand gewonnenen Erkenntnisse bezüglich des Einflusses der Querkraft auf die ROP und den  $a_{hv}$ -Wert auf das manuelle Arbeiten mit einem Bohrhammer übertragbar?*

*FF 6: Welche Erkenntnisse können anhand der erzielten Ergebnisse für die Anforderung von zukünftigen Prüfständen zur Analyse des Einflusses der Querkraft auf den Hammerbohrprozess abgeleitet werden?*

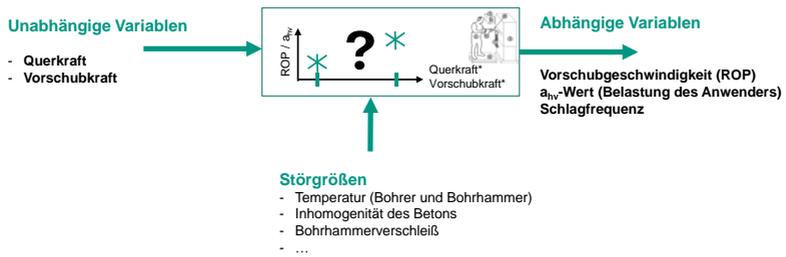


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung des Versuchsdesigns der Verifikationsstudie

## 5 Querkraftanalyse - Höhe und Korrelation mit Bewertungsgrößen (Explorative Studie)

Im Stand der Forschung sind die Einflüsse der Teilsysteme Bohrhammer und Umwelt auf die Vorschubgeschwindigkeit und  $a_{hv}$ -Wert bereits ausführlicher beschrieben. Es fehlt jedoch das Wissen, in welcher Höhe der Anwender Querkräfte beim Arbeiten mit einem Bohrhammer aufbringt. Hierbei ist lediglich bekannt, dass der Anwender eine Mindestvorschubkraft aufbringen muss, damit sich der Bohrhammer an einem stabilen Arbeitspunkt befindet. Wie der Anwender tatsächlich mit dem Bohrhammer arbeitet und ob er Querkräfte aufbringt, ist jedoch unbekannt. Deshalb soll in diesem Kapitel analysiert werden, in welcher Form Querkräfte beim Hammerbohren auftreten. Dadurch soll einerseits ein grundsätzliches Verständnis dafür entstehen, wie der Anwender arbeitet, andererseits soll geklärt werden, welches Verhalten vom Anwender während der kausalen Studien abgebildet werden sollte, um dessen Einfluss zu analysieren.

Um dieses Verständnis aufzubauen, werden zwei explorative Studien mit manuellen Versuchen durchgeführt. In der Vorstudie wird der Fokus auf das freie Arbeiten von drei Probanden mit einem Bohrhammer in drei Raumrichtungen gelegt. Einzige Anweisung ist es, eine subjektiv niedrige und hohe Vorschubkraft aufzubringen. Durch dieses Vorgehen kann die Abhängigkeit der Querkräfte von der Vorschubkraft für die unterschiedlichen Richtungen analysieren werden. In der Hauptstudie liegt der Schwerpunkt verstärkt auf der Größenordnung der von professionellen Anwendern aufgebrauchten Querkräften sowie der Erzeugung von Vergleichsdaten hinsichtlich der abhängigen Variablen für die weiteren Untersuchungen auf Prüfständen. Dafür werden in diesem Experiment unterschiedliche Vorschubkräfte gezielt eingestellt und 15 Probanden eingesetzt, welche in ihrem Arbeitsalltag regelmäßig mit Bohrhämmern arbeiten. Durch die professionellere Arbeitsweise und die größere Anzahl an Probanden sollen allgemeingültigere Aussagen getroffen werden können. Durch die Vorgabe der Vorschubkräfte kann zwar kein freies Arbeiten mehr analysiert werden, dafür können die späteren Ergebnisse des Prüfstands hinsichtlich der Veränderung des ROP und der  $a_{hv}$ -Werte im Vergleich zum manuellen Hammerbohren verifiziert werden.

Anhand des beschriebenen Vorgehens können die Forschungsfragen 1 und 2 beantwortet werden.

## 5.1 Vorstudie

Cronjäger et al. (1984) haben angemerkt, dass die Ausrichtung des Bohrers auf einem Prüfstand beim Hammerbohren die Vibrationswerte beeinflussen kann. Besitzt die Bohrerachse einen Winkelversatz zur Vorschubrichtung, entstehen Querkräfte. Im Gegensatz zum Prüfstand kann der Anwender beim manuellen Bohren diese Querkräfte (Momeni et al., 2017) ausregeln. Beim Menschen kann weiter angenommen werden, dass dieser keine perfekte Bewegung des Bohrers entlang der Bohrachse erzeugen kann, wodurch es zu Querkräften kommen würde. Um dies zu überprüfen, wird in der Vorstudie zunächst ein Experiment mit drei Probanden durchgeführt. Hierbei wird die Hypothese untersucht, ob die Vorschubkraft sowie die Bohrrichtung einen Einfluss auf die resultierenden Querkräfte haben. Im Anschluss an das Experiment soll ein theoretisches Modell aufgebaut werden, anhand dessen die Ergebnisse aus dem Experiment erklärt werden können.

*Das methodische Vorgehen, die Ergebnisse und die Diskussion dieses Unterkapitels basieren auf der Veröffentlichung:*

*„Experimental analysis of user forces by test bench and manual hammer drill experiments with regard to vibrations and productivity“ (Uhl, Bruchmüller & Matthiesen, 2019)*

*Abbildungen und Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus der Veröffentlichung übernommen. Im Gegensatz zu den Abbildungen werden die Texte aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.*

### 5.1.1 Fragestellungen

Die Vorstudie soll einen Beitrag zur Forschungsfrage 1 liefern:

*FF 1: Wie groß sind die Querkräfte von professionellen Anwendern beim Arbeiten mit einem Bohrhämmer und von welchen Parametern werden sie beeinflusst?*

Anhand der Vorstudie sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- *Treten beim manuellen Hammerbohren Querkräfte auf und wie hoch sind diese?*
- *Ist die Höhe der Querkräfte von der Bohrrichtung und der Vorschubkraft abhängig?*
- *Kann anhand eines Modells zur Analyse des Kräftesystems die Entstehung der Querkraft erklärt werden?*

## 5.1.2 Methodisches Vorgehen

In diesem Unterkapitel werden der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die Datenauswertung beschrieben.

### 5.1.2.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchung wurde ein Bohrhämmer von Hilti (Modell TE30-C, Hilti, Schaan, Liechtenstein), bestückt mit einem Betonbohrer (HM-Bohrer SDS-Plus 2-S, Hitachi, Willich, Deutschland) mit 12 mm Durchmesser und 200 mm Länge, verwendet. Die verwendete Werkstückprobe bestand aus C 20/25 Beton (Betonprüfkörper C 20/25, Rau-Betonfertigteile, Ebhausen, Deutschland) und hatte die Abmessungen 2400 mm x 1600 mm x 200 mm. Dies stimmt mit den in der Norm DIN EN ISO 28927-10 (DIN EN ISO 28927-10) definierten Anforderungen zur Ermittlung von  $a_{HV}$ -Werten überein. Zur Stabilisierung enthielt die Probe Bewehrungseisen, um größere Ausbrüche beim Überkopfbohren zu verhindern. Wie in der Norm (DIN EN 206) vorgegeben, härteten die Blöcke mindestens 28 Tage lang aus.

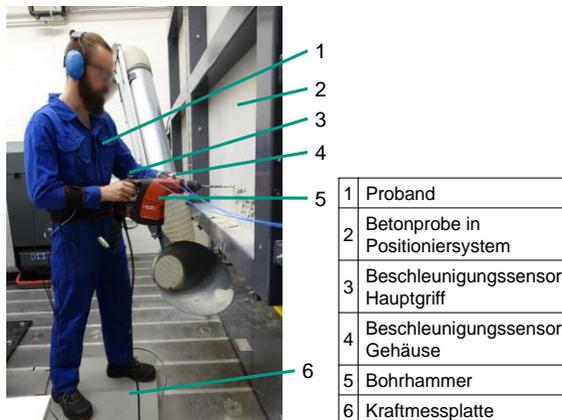


Abbildung 5.1: Beschreibung des Versuchsaufbaus zur Durchführung der manuellen Versuche (Übersetzt von Uhl et al., 2019)

Der Betonblock (2) konnte mittels einer Positioniereinheit in verschiedenen Orientierungen und Höhen eingestellt werden. Dies ermöglichte es, vertikal nach oben, nach unten und in alle Orientierungen dazwischen zu bohren. Zur Analyse der Anwenderinteraktionen mit dem Bohrhammer wurden die Vorschub- und Querkraft der Probanden (1) auf den Bohrhammer (5) mit einer Kraftmessplatte (6) (Typ AMTI Modell BP600900-1000, AMTI, Watertown, MA, USA) gemessen. Die Daten wurden mit einem Echtzeitsystem (ADwin-Pro II, Jäger, Lorsch, Deutschland) und einer Abtastrate von 20 kHz erfasst.

### 5.1.2.2 Probanden

In Anlehnung an die DIN EN ISO 28927-10 (DIN EN ISO 28927-10) hatten drei Probanden an dem Experiment teilgenommen. Alle Probanden wurden über ihre Rechte als Versuchspersonen informiert und füllten ein vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) genehmigtes Einwilligungsformular aus. Alle Probanden waren männlich und stammten aus dem wissenschaftlichen Umfeld. Sie bestätigten, geübt im Umgang von Bohrhämmern zu sein. Die relevanten anthropometrischen Daten der Probanden sind in Tabelle 5.1 dargestellt und mit den Daten der DIN 33402-2 (DIN 33402-2) für Personen im Alter von 18 – 65 Jahren verglichen. Die Probanden lagen hinsichtlich ihres Alters im unteren Bereich der Norm, während ihr Körpergewicht etwa dem 50. Perzentil entsprach. Die Körpergrößen der Probanden lagen alle über dem 50. Perzentil, wobei ein Proband das 95. Perzentil überschritt.

Tabelle 5.1: Alter und anatomische Daten der Probanden im Vergleich zu den Angaben aus der DIN 33402-2 (DIN 33402-2) (Übersetzt von Uhl et al., 2019)

	<b>Alter in Jahren</b>	<b>Gewicht in kg</b>	<b>Körpergröße in mm</b>
Perzentil		<b>5 / 50 / 95</b>	<b>5 / 50 / 95</b>
Norm	18-65	63.5 / 79 / 100	1650 / 1750 / 1855
Proband 1	36	83	1840
Proband 2	29	75	1900
Proband 3	27	81	1780

### 5.1.2.3 Versuchsablauf

In dem Experiment wurden, wie in Abbildung 5.2 dargestellt, drei Bohrrichtungen untersucht (*horizontal*, *vertikal nach oben* und *vertikal nach unten*). Alle Versuchsdurchläufe wurden mit dem gleichen Bohrhammer und Bohrer durchgeführt. Jeder Proband vollzog einen vollfaktoriellen Versuchsplan mit vier Versuchswiederholungen. Somit wurden in Summe 90 Einzelversuche ausgeführt. Da der zeitliche Aufwand für die Drehung der Betonprobe relativ groß war, war der Versuchsplan nicht randomisiert. Die Versuchsaufbauten unterschieden sich in den Vorgaben für die Vorschubkraft sowie der Bohrrichtung. Hinsichtlich der Vorschubkraft sollten die Probanden eine subjektiv *niedrige* bzw. eine *hohe* Vorschubkraft aufbringen. Das heißt, während des Bohrens wurde die Vorschubkraft gemessen, jedoch den Probanden keine visuelle Rückmeldung gegeben. Bei jedem Durchgang wurde der Trigger des Bohrhammers komplett durchgedrückt und eine Bohrtiefe von 100 mm vorgegeben. Die Körperhaltung beim horizontalen Bohren (siehe Abbildung 5.2 - links) orientierte sich an der ISO 10068 (ISO 10068). Für das Bohren nach oben (Mitte) wurde das Werkstück so positioniert, dass am Ellenbogen ein Beugewinkel von etwa 90 Grad eingehalten wurde. Entsprechend den Vorgaben der Norm DIN EN ISO 28927-10 (DIN EN ISO 28927-10) wurde die Position des Werkstücks beim Bohren nach unten (rechts) so eingestellt, dass die jeweiligen Probanden beim Bohren nahezu aufrecht standen.



Abbildung 5.2: Beispielhafte Darstellung der von den Probanden eingenommenen Körperhaltung bei den drei Bohrrichtungen: horizontal (linkes Bild), vertikal nach oben (mittleres Bild), vertikal nach unten (rechtes Bild) (Uhl et al., 2019).

#### 5.1.2.4 Datenauswertung

Der Bohrvorgang, welcher in Abbildung 5.3 zu sehen ist, kann in die Sequenzen *Bohrer ansetzen*, *Beginn Bohren* mit den Schritten Bohrhämmer einschalten und Sollkraft aufbauen, das eigentliche *Bohren* und *Herausziehen des Bohrers* gegliedert werden. In dieser Studie wurde bei der Auswertung der Daten nur ein Teil der Sequenz *Bohren* analysiert. In den Messdaten wurde zunächst diese Sequenz identifiziert und ein Zeitraum von zehn Sekunden innerhalb des Bereiches ausgewertet. Neben der Kraft in Vorschubrichtung kann der Anwender auch unbeabsichtigte Querkräfte ausüben. Das Ziel der Vorstudie war es zu untersuchen, welche Größenordnungen die Querkräfte hatten. Aus diesem Grund wurden die Vorschubkraft- und die Querkraft-Zeitverläufe analysiert. Es wurde ein Butterworth Tiefpassfilter 4. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 5 Hz verwendet. Schließlich wurden der resultierende Vektor der beiden Richtungen (x- und y-Richtung) berechnet und die Mediane der Vorschub- und Querkräfte über den Auswertzeitraum ermittelt. Bei der Analyse wurde nach den Faktoren Vorschubkraft und Bohrrichtung unterschieden. Wie im Kapitel 3.1.2 beschrieben, kann es bei der Nutzung einer Kraftmessplatte zu Trägheitskräften durch schnelle Bewegungen des Anwenders kommen. Da jedoch der Hammerbohrprozess als quasistatisch betrachtet werden kann und der ermittelte Median durch einzelne Ausreißer bzw. Extremwerte nahezu unbeeinflusst wird, kann die Querkraft anhand einer Kraftmessplatte sicher bestimmt werden. Im Kapitel *Ergebnisse* wurden Mittelwerte ( $M$ ), Median ( $Mdn$ ), Standardabweichung ( $SD$ ) und Interquartilsabstand ( $IQA$ ) angegeben. P-Werte  $< .05$  wurden als signifikant angesehen. In dieser Arbeit wird die Notation bezüglich der statistischen Schreibweise entsprechend den Vorgaben der Deutschen Gesellschaft für Psychologie gehalten. Daraus folgt insbesondere, dass eine Null vor dem Dezimaltrennzeichen angegeben wird, wenn der Zahlenwert größer als Null werden kann. Bei statistischen Größen, bei welchen dies nicht möglich ist, entfällt die Null. Die Stellen nach dem Dezimaltrennzeichen werden auf zwei Stellen gerundet, außer bei Wahrscheinlichkeitsangaben. Um ein einheitliches Erscheinungsbild in dieser Arbeit zu erhalten, wird als Dezimaltrennzeichen ein Punkt gewählt.

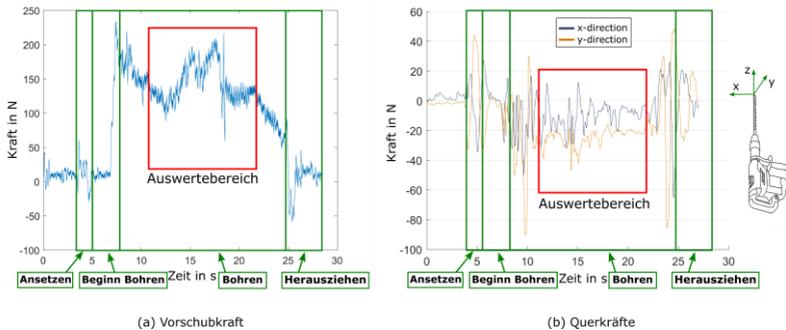


Abbildung 5.3: Beschreibung der typischen Phasen während dem manuellen Hammerbohren anhand des Kraftverlaufes gemessen mittels einer Kraftmessplatte unterhalb des Anwenders. Bei diesem Beispielverlauf wurde mit einem Bohrhammer vertikal nach oben gebohrt. (Übersetzt von Uhl et al., 2019)

### 5.1.3 Ergebnisse

Die Messdaten der Vorschubkraft wurden im Hinblick auf die Bohrrichtungen und das vorgegebene Vorschubkraftlevel analysiert. So enthält jeder Tabellenwert (siehe Tabelle 5.2) die Daten aller Versuchspersonen. Obwohl sich die Vorschubkraft mit den Faktorstufen *hoch* und *niedrig* in der Raumrichtung *Bohren horizontal* und *vertikal nach oben* überlappen, war ein deutlicher Unterschied in den Medianen der mittleren Vorschubkraft zu erkennen. Außerdem waren die Mediane beim Abwärtsbohren tendenziell höher als in den anderen Richtungen. Ein Vergleich der einzelnen Bohrrichtungen zeigte die geringste Streuung der Vorschubkraft bei horizontalen Bohrungen.

Tabelle 5.2: Deskriptive Statistik (Mdn = Median, IQA = Interquartilsabstand, Max = Maximalwert, Min = Minimalwert) der Mittelwerte je Versuche der von den drei Probanden aufgebrauchten Vorschubkräfte. Hierbei werden die Faktoren Vorschubkraft sowie Bohrrichtung unterschieden (n = 90).

Bohr- richtung	horizontal		vertikal nach oben		vertikal nach unten	
	niedrig	hoch	niedrig	hoch	niedrig	hoch
Mdn [N]	93.5	180.9	97.3	152.9	112.7	267.7
IQA [N]	10.2	29.4	23.3	76.2	93.3	35.7
Max [N]	190.4	225.7	143.1	270	204.2	336.5
Min [N]	77.9	83	54.2	104.6	73.9	241.3

Die Mediane und Maximalwerte der mittleren Querkräfte für jedes Versuchssetup wurden berechnet und in Tabelle 5.3 zusammengefasst. Bei der Untersuchung der Querkräfte wird deutlich, dass die Mediane der Querkräfte in den Versuchen mit hoher Vorschubkraft höher waren als bei denen mit niedriger Vorschubkraft. Die Absolutwerte der aufgebrauchten Querkräfte waren in allen Bohrrichtungen vergleichbar. Wird der Median der Querkräfte mit dem Mittelwert der Vorschubkraft des jeweiligen Versuchssetups verglichen, so lagen die Querkräfte bei ca. 6 – 9 % der Vorschubkraft. Die Maximalwerte der Mediane der Querkräfte je Versuchsdurchläufe konnten jedoch deutlich höher liegen. Das Maximum in horizontaler Bohrrichtung mit hohem Vorschubkraft betrug 55.6 N.

Tabelle 5.3: Median und Maximalwert der Querkraft je Bohrrichtung und Vorschubkraft in dem ausgewählten Bereich (siehe Abbildung 5.3) während dem Bohrprozess. (n = 90) (Übersetzt von Uhl et al., 2019)

<b>Bohrrichtung</b>	<b>Vorschubkraft</b>	<b>Median der Querkraft [N]</b>	<b>Maximale Querkraft [N]</b>
horizontal	hoch	10.5	55.6
	niedrig	8.5	19.1
vertikal nach oben	hoch	11.5	29.6
	niedrig	5.8	13.1
vertikal nach unten	hoch	16.2	33.2
	niedrig	7.3	11.4

Für ein besseres Verständnis, wie die Richtung des Querkraftvektors in der xy-Ebene mit den Bohrrichtungen und der Höhe der Vorschubkraft zusammenhängen, sind diese in Abbildung 5.4 visualisiert. Das 95. Quantil (85 von 90 Versuchen) aller Querkräfte war geringer als 27.8 N und ist in der Abbildung anhand der gepunkteten Kreise verdeutlicht. Wie bereits anhand der Tabelle 5.3 ersichtlich ist, zeigt sich ebenso in den Diagrammen, dass bei geringeren Vorschubkräften die Querkräfte ebenfalls geringer waren. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Kraftvektor bei den Versuchsdurchläufen mit horizontaler Bohrrichtung in negative x-Richtung zeigte. Beim vertikalen nach oben und nach unten Bohren zeigten Großteile der Kraftvektoren der einzelnen Messungen in die positive x-Richtung und y-Richtung.

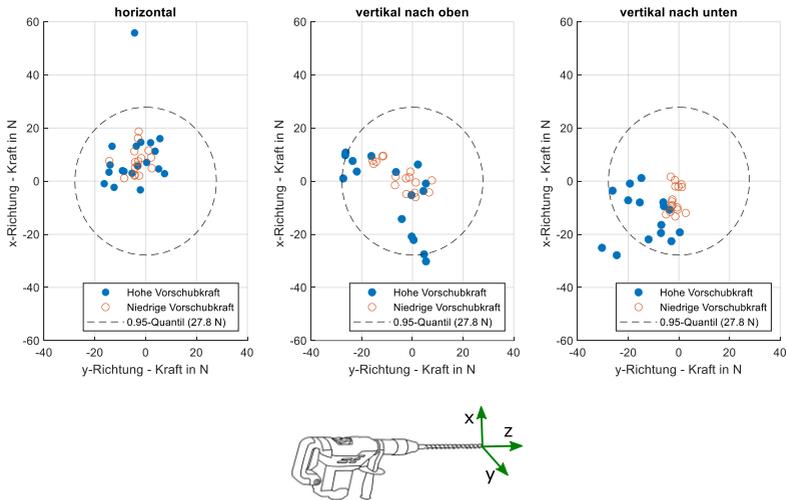


Abbildung 5.4: Abbildung des Querkraftvektors je Bohrrichtung und der subjektiven Vorschubkraft (n =90). (Übersetzt von Uhl et al., 2019)

### 5.1.4 Theoretische Betrachtung der Querkraft

Bei der Betrachtung der Ergebnisse bezüglich der aufbrachten Querkräfte wird deutlich, dass es eine Abhängigkeit der Querkraft mit der Vorschubkraft in Interaktion mit der Bohrrichtung gab. Aufgrund dessen soll in diesem Unterkapitel ein theoretisches Modell aufgebaut werden, um diese Abhängigkeiten besser verstehen zu können. In Abbildung 5.5 werden dafür die auftretenden statischen Kräfte, welche beim Hammerbohren auftreten, abgebildet. Beim Bohren treten im Wesentlichen zwei Zustände auf. Im Zustand 1 (siehe Abbildung 5.5 a) setzt der Anwender den Bohrhammer lediglich auf dem Untergrund auf. Entscheidend hierbei ist, dass die Orientierung des Bohrers frei über eine Drehung um die Bohrspitze verändert werden kann. Somit können keine Momente vom Untergrund aufgenommen werden. Beim Zustand 2 (siehe Abbildung 5.5 b und c) wurde bereits eine gewisse Bohrtiefe erreicht. Durch ein Abstützen in Querrichtung des Bohrers an der Bohrspitze sowie am Bohrlochrand kann ein Moment aufgenommen werden und dadurch ein eingespannter Zustand des Bohrers angenommen werden.

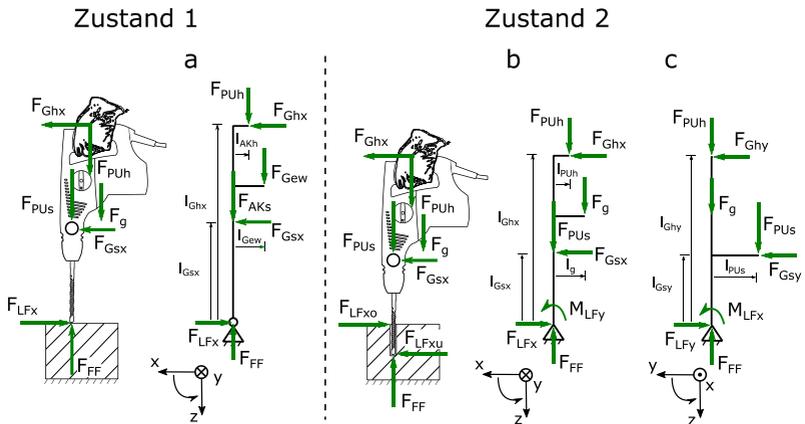


Abbildung 5.5: Kräftesysteme für das vertikal nach unten Bohren bei den beiden Zuständen Ansetzen (a) und Bohren mit der Ansicht in y-Richtung (b) bzw. in x-Richtung (c) in Abhängigkeit der Andruckkräfte (Hauptgriff:  $F_{PUh}$ , Seitengriff:  $F_{PUs}$ ) sowie Führungskräfte (Hauptgriff:  $F_{Ghx}$ , Seitengriff:  $F_{Gsx}$ ) der Vorschubkraft  $F_{FF}$ , der Querkraft  $F_{LF}$  und des Gerätewichts  $F_g$

Um die Entstehung der Querkräfte  $F_{LF}$  nachvollziehen zu können, werden die Gleichungen der Kräfte- und Momentengleichgewichte um die Einspannung des Bohrers in Abhängigkeit der Andruckkraft am Hauptgriff  $F_{PUh}$  und am Seitengriff  $F_{PUs}$ , des Gerätewichts  $F_g$  für den Zustand 1 aufgestellt. Die Kräftegleichgewichte in z-Richtung und x-Richtung lauten:

$$\sum F_z = 0 \mid F_{FF} = F_{PUs} + F_{PUh} + F_g \quad 5.1$$

$$\sum F_x = 0 \mid F_{LFx} = F_{Gsx} + F_{Ghx} \quad 5.2$$

Im letzten Schritt wird noch das Momentengleichgewicht um  $M_L$  aufgestellt:

$$\sum M_y = 0 \left| F_{Gx} = F_{PUh} \cdot \frac{l_{PUh}}{l_{Gsx} + l_{Ghx}} + F_{PUs} \cdot \frac{l_{PUs}}{l_{Gsx} + l_{Ghx}} + F_g \cdot \frac{l_g}{l_{Gsx} + l_{Ghx}} \right. \quad 5.3$$

Alle Längen sowie die Gewichtskraft  $F_g$  sind in diesem Zustand konstant. Somit steigt die Querkraft, je höher die Andruckkraft des Anwenders ist. Sowohl das Eigengewicht des Bohrhammers als auch die Andruckkraft werden parallel zu Bohrachse aufgebracht. Anhand des theoretischen Modells wird deutlich, dass beim Ansetzen (*Zustand 1*) eine Querkraft vom Anwender aufgebracht werden muss, damit sich der Bohrhammer nicht um die y-Achse um die Bohrerspitze dreht.

Entsprechend des *Zustands a* werden die Gleichungen für die Kräfte- und Momentengleichgewichte des *Zustands b* aufgestellt. Die Kräftegleichgewichte in z-Richtung und x-Richtung lauten:

$$\sum F_z = 0 \left| F_{FF} = F_{PUs} + F_{PUh} + F_g \right. \quad 5.4$$

$$\sum F_x = 0 \left| F_{LFx} = F_{Gs} + F_{Gh} \right. \quad 5.5$$

Im letzten Schritt wird noch das Momentengleichgewicht um  $M_{Lzy}$  aufgestellt:

$$\sum M_y = 0 \left| M_{Lzy} = F_{PUh} \cdot l_{PUh} + F_g \cdot l_g - F_{Ghx} \cdot l_{Ghx} - F_{Gsx} \cdot l_{Gsx} \right. \quad 5.6$$

Während des *Zustands b* sind ebenfalls das Gerätegewicht sowie die Längen  $l_{PUh}$ ,  $l_{PUs}$  und  $l_g$  konstant. Die Führungskräfte und damit auch die Querkraft wird umso kleiner, je kleiner die Abstände  $l_{PUh}$  und  $l_{PUs}$  werden bzw. je größer die Bohrtiefe wird. Das durch die Andruckkraft und Gerätegewicht entstehende Moment kann bei diesem Zustand über die beiden Querkräfte  $F_{LFxu}$  und  $F_{LFxo}$  abgestützt werden.

Somit kann aus dem Modell geschlossen werden, dass beim Ansetzen des Bohrers immer eine Querkraft aufgebracht werden muss. Ansonsten würde die Bohrerspitze zur Seite abrutschen. Beim eigentlichen Bohrvorgang kann die durch die

Andruckkraft und das Bohrhammergewicht zur Bohrerachse entstehende exzentrische Kraft entweder durch eine Querkraft oder ein Moment um die Bohrerspitze abgestützt werden. Hierbei liegt ein Zusammenhang zwischen dem Moment  $M_L$ , der Querkraft und der Bohrtiefe vor.

### 5.1.5 Diskussion

Das Ziel der Vorstudie war es zu untersuchen, ob beim Hammerbohren Querkräfte auftreten und inwiefern diese von den Faktoren Vorschubkraft und Bohrrichtung abhängen.

Die Analyse der Median- und Maximalwerte der Querkraft (Tabelle 3) zeigt deutlich, dass beim manuellen Bohren in allen Bohrrichtungen Querkräfte auftreten. Außerdem steigen die Querkräfte mit zunehmender Vorschubkraft an. Anhand des theoretischen Modells lässt sich schließen, dass eine Querkraft in positiver x-Richtung bereits durch die zur Bohrachse exzentrisch aufgebrachte Andruckkraft entsteht. Die Andruckkraft erzeugt ein Moment um die y-Achse um die Bohrerspitze. Bringt der Anwender kein Gegenmoment über den Haupt- oder Seitengriff auf, muss dieses durch das Abstützen des Bohrers im Bohrloch (Zustand 2) realisiert werden. Dies führt letztendlich zu dem Auftreten einer Querkraft. Höhere Kräfte in y-Richtung entstehen vermutlich, wenn der Anwender verstärkt Kräfte über den Seitengriff aufbringt. Insbesondere beim vertikal nach oben Bohren kann dies durch eine erhöhte Anstrengung bzw. ein Ermüden des Probanden erklärt werden. Beim vertikalen Bohren nach unten kann die höhere Kraft am Seitengriff dadurch erklärt werden, dass der Anwender hierbei sein Körpergewicht einsetzt. Der Schwerpunkt der genutzten Körpermassen befindet sich jedoch nicht oberhalb des Bohrhammers und hat somit den gleichen Effekt wie die zur Bohrerachse versetzte Andruckkraft. Im Gegensatz zu den beiden anderen Bohrrichtungen scheint es beim horizontalen Bohren durch eine Erhöhung der Vorschubkraft keinen wesentlichen Einfluss auf die Querkraft zu geben. Die entstehenden Kräfte in negativer x-Richtung können mit dem Gerätegewicht begründet werden. In diesem Fall muss der Anwender eine Hebekraft aufbringen, da das Gerätegewicht nicht in der Bohrachse wirkt. Befindet sich der Bohrer ausreichend tief im Beton, kann das Gerätegewicht durch das Moment  $M_L$  abgestützt werden. Aufgrund der geringen Anzahl an Probanden und da die Vorschubkraft nur subjektiv eingestellt wurde, sollte dieser Effekt noch weiter in der Hauptstudie untersucht werden. Zusätzlich sollte die Andruckkraft je Bohrhammergriff gemessen werden, um die Hypothese zu untersuchen, ob die erhöhte Querkraft beim vertikal nach unten Bohren aufgrund der erhöhten Andruckkraft über den Seitengriff entsteht.

Anhand der Vorstudie konnte gezeigt werden, dass nicht-professionelle Anwender Querkräfte beim Hammerbohren aufbringen. Weiterhin scheinen die aufgebrachten Querkräfte von der Bohrrichtung sowie der Vorschubkraft abzuhängen. Durch das theoretische Modell konnten die gemessenen Richtungen der Querkraftvektoren erklärt werden. In der folgenden Hauptstudie sollten einerseits professionelle Anwender als Probanden eingesetzt und andererseits definierte Vorschubkräfte vorgegeben werden. Dadurch ist es möglich genaue Zusammenhänge der Querkraft mit den unabhängigen Variablen Vorschubkraft und Bohrrichtung nachzuweisen.

## 5.2 Hauptstudie

Die Vorstudie hat gezeigt, dass beim Hammerbohren grundsätzlich Querkräfte auftreten und diese bei unterschiedlichen Vorschubkräften und Bohrrichtungen variieren können. Einschränkungen der Studie hinsichtlich der Beantwortung von Forschungsfrage 1 sind jedoch die nicht-professionellen Probanden, deren geringe Anzahl sowie die subjektiv aufgebrachten Vorschubkräfte. Um die Forschungsfrage 2 beantworten zu können werden Vergleichsdaten benötigt, um die Prüfstandergebnisse aus den nachfolgenden kausalen Studien verifizieren zu können. Aufgrund dessen wird ein Experiment mit 15 Probanden durchgeführt, welche in ihrem Arbeitsumfeld regelmäßig mit Bohrhämmern arbeiten. Dadurch ist es möglich eine allgemeinere Aussage bezüglich der aufgebrachten Querkräfte zu treffen. Da neben der Untersuchung der Querkräfte auch die Daten für die Prüfstandverifikation genutzt werden sollen, wurden in diesem Experiment Vorschubkräfte vorgegeben sowie die Faktoren Bohrerdurchmesser, Bohrertyp und Bohrrichtung variiert. Dadurch kann einerseits untersucht werden, welche Parameter später variiert bzw. konstant gehalten werden sollten und andererseits nachvollzogen werden, ob auf dem Prüfstand vergleichbare Prozesszustände wie beim manuellen Bohren erreicht werden.

*Das methodische Vorgehen, die Ergebnisse und die Diskussion bezüglich der Bewertungsgröße Bohrhammervibrationen dieses Kapitels basieren auf der Veröffentlichung:*

*“The Influence of Human Interaction on the Vibration of Hand-Held Human-Machine Systems - The Effect of Body Posture, Feed Force, and Gripping Forces on the Vibration of Hammer Drills” (Lindenmann, Uhl, Gwosch & Matthiesen, 2021)*

*Die Ergebnisse und die Diskussion bezüglich der Bewertungsgröße Produktivität dieses Kapitels basieren auf der Veröffentlichung:*

„Analysis of Factors Influencing the Productivity of Hammer Drilling – User Forces, Human Fatigue, Drilling Direction, and Drill Bit“Lindenmann, Uhl et al. (2021)

Abbildungen und Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus den beiden Veröffentlichungen übernommen. Im Gegensatz zu den Abbildungen werden die Texte aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

## 5.2.1 Fragestellungen

In diesem Kapitel sollen die Forschungsfragen 1 und 2 beantwortet werden:

*FF 1: Welche Größenordnung haben die Querkräfte von professionellen Anwendern beim Arbeiten mit einem Bohrhämmer und von welchen Parametern werden sie beeinflusst?*

*FF 2: Welchen Einfluss haben die Vorschubkraft, Bohrrichtung und der Bohrer beim manuellen Hammerbohren auf die ROP und  $a_{hv}$ -Wert und gibt es eine Korrelation zwischen diesen und der Querkraft?*

Die dafür notwendigen Untersuchungen helfen die Zusammenhänge der aufgetragenen Querkräfte besser zu verstehen und die Gültigkeit der Erkenntnisse aus der Vorstudie zu überprüfen.

- *Wie groß sind die aufgetragenen Querkräfte von professionellen Arbeitern beim Hammerbohren?*
- *Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Faktoren Vorschubkraft und Bohrrichtung mit der Querkraft?*
- *Besteht eine Korrelation zwischen der Querkraft und den Größen Vorschubgeschwindigkeit, Schlagfrequenz und  $a_{hv}$ -Wert?*
- *Wie hoch sind die entstehenden Vorschubgeschwindigkeiten und  $a_{hv}$ -Werte und wie hängen diese von den Faktoren Vorschubkraft, Bohrerdurchmesser, Bohrerart und Bohrrichtung ab?*

## 5.2.2 Methodisches Vorgehen

In diesem Kapitel sollen die aus der Vorstudie erforschten Erkenntnisse anhand einer größeren Probandenanzahl, welche in ihrem Arbeitsalltag regelmäßig mit Bohrhämmern arbeiten, überprüft werden. Im Gegensatz zur Vorstudie werden für den Faktor Vorschubkraft drei Faktorstufen eingestellt. Dies ist wichtig, um einen eventuell nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Vorschubkraft und den Querkräften sowie den Bewertungsgrößen erforschen zu können. Dadurch können

Aussagen aus den automatisierten Experimenten besser überprüft werden. Weiterhin wird zur Reduktion des Aufwandes lediglich die beiden Bohrrichtungen vertikal nach unten und horizontal untersucht. In diesem Unterkapitel werden der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die Datenauswertung beschrieben.

### 5.2.2.1 Versuchsaufbau

Für das Experiment wurde eine Kraftmessplatte (siehe Abbildung 5.6 Punkt 4) (Typ AMTI Modell BP600900-1000, AMTI, Watertown, MA, USA) verwendet, um die Vorschub- und Querkräfte zu messen. Außerdem wurde eine Strommesszange (Modell i310s, Fluke Corporation, Everett (Washington), USA) genutzt, um zu erkennen, ob der Trigger des Bohrhammers betätigt wurde. Der Bohrhämmer wurde mit zwei PCB 356A02 Beschleunigungsaufnehmern (PCB Piezotronics, Depew, NY, USA) bestückt, die am Haupt- und am Seitengriff angebracht waren. Gemäß DIN EN ISO 5349-2:2015-12 (DIN EN ISO 5349) wurden die Sensoren so nah wie möglich an der Hand angebracht. Ein Datenerfassungssystem (Q.brixx Station 101T, Gantner Instruments GmbH, Schruns, Österreich) zeichnete die Daten mit einer Frequenz von 10 kHz auf. Die Probanden bohrten in zwei unbewehrte Betonblöcke (Betonprüfkörper C 30/37, Rau-Betonfertigteile, Ebhausen, Deutschland) mit einem Gewicht von 1.314 t und einer Abmessung von 1450 mm x 980 mm x 370 mm. Beide Blöcke wurden fünf Monate vor dem Experiment hergestellt und hatten dementsprechend mindestens 28 Tage Zeit auszuhärten (DIN EN ISO 28927-10). Wie in Abbildung 5.6 dargestellt, lag ein Block horizontal (2) neben der Kraftmessplatte für die vertikale Bohrung nach unten. Die Oberseite des Blocks hatte vom Boden aus gemessen eine Höhe von 540 mm. Der Betonblock für das horizontale Bohren (3) stand senkrecht auf der gegenüberliegenden Seite der Kraftmessplatte. Für die Studie wurden ein Bohrhämmertyp (6) (Modell GBH 3-28 DRE, Robert Bosch Power Tools GmbH, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland) und drei verschiedene Bohrer verwendet. Für einen Teil der Versuchsdurchläufe wurde der Bohrhämmer mit Kraftmessfolien (pliance-xf-32 with 10x16 and 8x16 foil, novel GmbH, München, Deutschland) ausgestattet. Diese wurden genutzt, um die Andruckkräfte der einzelnen Griffe zu bestimmen. Im Versuch wurden Bohrer mit vier Schneidkanten mit Durchmessern von 6 und 10 mm (Typ TE-CX (SDS plus), Hilti AG, Schaan, Liechtenstein) und ein Bohrer mit zwei Schneidkanten mit einem Durchmesser von 10 mm (Typ F4 FORTE, ALPEN-MAYKESTAG GmbH, Puch, Österreich) verwendet.

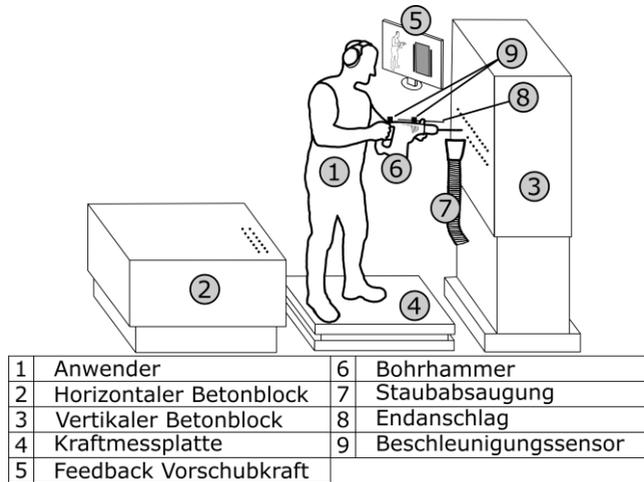


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus am Beispiel des horizontalen Bohrens (Übersetzt und angepasst von Uhl, Lindenmann & Matthiesen, 2021)

Von jedem Bohrertyp wurden zwei Stück verwendet und nach der Hälfte der Gesamtanzahl der Bohrungen ausgetauscht. Nach Antonucci et al. (Antonucci et al., 2017) und Weinert et al. (Weinert et al., 1993) hat ein Anstieg des Verschleißes einen negativen Einfluss auf den ROP. Daher wurde eine Voruntersuchung durchgeführt, um die kumulativen Bohrmeter zu ermitteln, bei denen der Bohrerverschleiß den größten Einfluss auf den ROP hat. Hierbei konnte gezeigt werden, dass sich der Einfluss des Bohrerverschleißes auf die ROP bei dem gewählten Setup nach 25 Bohrungen deutlich verringerte (Uhl et al., 2021). Aus diesem Grund wurden vor der eigentlichen Untersuchung zunächst 25 Bohrungen mit allen Bohrern gesetzt. Während des Bohrens wurde der Staub, welcher durch den Bohrer aus dem Bohrloch transportiert wurde, durch ein Absaugsystem (7) abgesaugt und dem Probanden über einen Monitor (5) eine Rückmeldung über die aktuelle Vorschubkraft gegeben. Zur Einhaltung der definierten Bohrtiefe wurde ein Tiefenanschlag (8) verwendet.

### 5.2.2.2 Probanden

An dem Experiment nahmen 14 männliche Probanden und eine weibliche Probandin teil. Alle Probanden wurden über die Rechte der Versuchspersonen

informiert sowie über die Tatsache, dass alle Daten anschließend anonymisiert wurden und füllten ein vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) genehmigtes Einwilligungsfomular aus. Die Probanden gaben an, Bohrhämmer in ihrem Arbeitsalltag regelmäßig zu benutzen (9 täglich, 5 wöchentlich, 1 monatlich). 13 Teilnehmer waren Rechtshänder und benutzten ihre rechte Hand am Hauptgriff des Bohrhammers. Die Probanden waren zwischen 25 und 60 Jahre alt und hatten keine körperlichen Einschränkungen. Alle Probandendaten sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst und mit den durchschnittlichen Körpermaße des Menschen aus der DIN 33402-2 verglichen. Dadurch kann eine Einordnung der teilgenommenen Probanden zu den Maßen eines durchschnittlichen Erwerbstätigen vorgenommen werden.

Tabelle 5.4: Alter und anthropometrische Daten der Probanden im Vergleich zur DIN 33402-2 (DIN 33402-2) (Übersetzt von Uhl et al., 2021)

	<b>Norm</b>	<b>Probanden</b>
Alter [Jahre]	18 – 65	9 (25 – 40) 6 (41 – 60)
Gewicht [kg] 5 / 50. / 95. Perzentil	63,5 / 79 / 100	64,1 / 83 / 101
Körpergröße [mm] 5 / 50. / 95. Perzentil	1650 / 1750 / 1855	1693 / 1820 / 1893
Biologisches Geschlecht (weiblich / männlich)		1 / 14
Händigkeit (rechts / links)		13 / 2

### 5.2.2.3 Versuchsablauf

Während der Studie wurden die Faktoren Bohrrichtung, Bohrer (Durchmesser und Typ) und Vorschubkraft variiert. Alle Faktorstufen sind in Tabelle 5.5 aufgeführt. Es wurde ein vollfaktorieller, randomisierter Versuchsplan mit zehn Wiederholungen und drei Zentralpunkten verwendet (insgesamt konnten 229 von 230 Durchläufen ausgewertet werden). Den Probanden wurde vor dem Experiment nicht mitgeteilt, dass die Querkraft gemessen wurde. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die Probanden bezüglich dieser abhängigen Variable nicht beeinflusst wurden.

Tabelle 5.5: Im Experiment eingestellte Faktorstufen für Bohrrichtung (zweistufig), Vorschubkraft (dreistufig) und Bohrer (dreistufig) (Übersetzt von Uhl et al., 2021)

Faktor	Level 1	Level 2	Level 3
Bohrrichtung	horizontal	vertikal nach unten	-
Vorschubkraft	100 N	150 N	200 N
Bohrerdurchmesser/ -typ	6 mm / 4 Schneidkanten	10 mm / 4 Schneidkanten	10 mm / 2 Schneidkanten

Wie in Abbildung 5.7 dargestellt, wurden die aktuelle Bohrrichtung und der Sollwert der Vorschubkraft auf einem Display mit Kraftfeedback angezeigt. Der aktuelle Wert der Vorschubkraft wurde als laufender Balken (gefiltert mit 0.1 Hz) dargestellt. Eine rote Lampe auf dem Monitor diente als Startsignal für den Teilnehmer. Während des Bohrvorgangs wurde der Trigger des Bohrhammers voll betätigt. Um eine definierte Bohrtiefe von 90 mm zu gewährleisten, war am Bohrhammer ein Tiefenanschlag angebracht. Sobald die vorgegebene Bohrtiefe erreicht wurde, sollte der Trigger vom Teilnehmer losgelassen werden. So konnte der Endzeitpunkt aus dem Stromsignal ermittelt werden. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, durften die Teilnehmer den Bohrer während des Bohrens zum Entlüften des Bohrloches nicht herausziehen.



Abbildung 5.7: Exemplarische Abbildung der beiden Bohrrichtungen. Im linken Bild ist das horizontale und im rechten Bild das vertikale nach unten Bohren zu sehen. Zusätzlich ist im rechten Bild die Anzeige zur Vorgabe der Bohrrichtung sowie das visuelle Feedback der Vorschubkraft erkennbar. Diese wurde für eine übersichtlichere Darstellung im linken Bild entfernt. (Übersetzt von Uhl et al., 2021)

#### 5.2.2.4 Datenauswertung

Zunächst wurden die Datensätze mit MATLAB (R2017b, MathWorks, Natick (Massachusetts), USA) verarbeitet. Dabei wurden die Rohdaten auf den relevanten Zeitraum, in dem der Bohrvorgang durchgeführt wurde, zugeschnitten. Anschließend wurden aus dem zeitlichen Verlauf der gemessenen Signale charakteristische Werte ermittelt. Diese Werte wurden im nächsten Schritt für die statistische Auswertung verwendet. Die statistische Analyse wurde mit der Software SPSS (IBM SPSS Statistics 25, IBM, Armonk (New York), USA) durchgeführt. Im Kapitel *Ergebnisse* wurden Mittelwerte ( $M$ ), Median ( $Mdn$ ), Standardabweichung ( $SD$ ) und Interquartilsabstand ( $IQA$ ) angegeben. P-Werte  $< .05$  wurden als signifikant angesehen. In dieser Arbeit wird die Notation bezüglich der statistischen Schreibweise entsprechend den Vorgaben der Deutschen Gesellschaft für Psychologie gehalten. Daraus folgt insbesondere, dass eine Null vor dem Dezimaltrennzeichen angegeben wird, wenn der Zahlenwert größer als Null werden kann. Bei statistischen Größen, bei welchen dies nicht möglich ist, entfällt die Null. Die Stellen nach dem Dezimaltrennzeichen werden auf zwei Stellen gerundet, außer

bei Wahrscheinlichkeitsangaben. Um ein einheitliches Erscheinungsbild in dieser Arbeit vorzuweisen, wird als Dezimaltrennzeichen ein Punkt gewählt.

#### **5.2.2.5 Berechnung der Vorschubkraft**

Die Ermittlung der aufgebrauchten Vorschubkräfte wurde mittels der Kraftmessplatte realisiert. Daraus konnte jedoch nicht geschlossen werden, über welchen Griff die dafür notwendige Andruckkraft aufgebracht wurde. Zur Bestimmung der entsprechenden Griffbelastung wurden die Kraftmessfolien herangezogen. Anhand dieser wurde das Verhältnis der Andruckkräfte zwischen den beiden Griffen bestimmt. Die hierfür notwendige Berechnung der Andruckkraft wurde entsprechend der DIN 45679 (DIN 45679) bzw. Lindenmann et al. (Lindenmann et al., 2021) realisiert.

#### **5.2.2.6 Analyse der Querkraft**

Für die statistische Analyse der aufgebrauchten Querkräfte wurde der Betrag des resultierenden Vektors der beiden Querkräfte von der Kraftmessplatte verwendet. Hierfür wurden die zugeschnittenen Rohsignale zunächst gefiltert (Butterworth Tiefpassfilter 4. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz). Je Versuchsdurchlauf wurde anschließend der Median aus dem Zeitsignal des resultierenden Vektorbetrags ermittelt. Da bei den Untergruppen der Querkraft keine Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) vorlag, wurde ein Kruskal-Wallis-Test mit nachgelagertem Dunn-Bonferroni-post-hoc-Test gewählt, um den Einfluss von Vorschubkraft und Bohrrichtung auf die Querkraft nachzuweisen.

#### **5.2.2.7 Korrelationsanalyse der Querkraft mit den abhängigen Variablen**

Auf Basis der Messdaten wurde eine Korrelationsanalyse zwischen der Querkraft sowie den Größen ROP,  $a_{nv}$ -Werte am Seitengriff und Hauptgriff sowie der Schlagfrequenz durchgeführt. Für diese Analyse wurden lediglich die Bohrer mit einem Durchmesser von 10 mm genutzt, um die Streuung der abhängigen Variablen möglichst zu verringern und dadurch aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten. Da aus dem Stand der Forschung bekannt ist, dass der Faktor Vorschubkraft die abhängigen Variablen beeinflusst, wurde eine partielle Korrelation angewandt. Der Faktor Vorschubkraft wurde hierbei als Kontrollvariable angegeben.

#### **5.2.2.8 Analyse der Vorschubgeschwindigkeit**

Die ROP je Bohrung wurde ermittelt, indem die vorgegebene Tiefe (90 mm) durch die gemessene Bohrzeit dividiert wurde. Um zu untersuchen, welche Faktoren die ROP beeinflussen, wurden Ausreißer (3 Stück) durch Transformation (90%-Winsorizing) begrenzt. Das Auftreten dieser Ausreißer kann durch die Unsicherheit

der ROP-Messmethode erklärt werden. Diese Unsicherheit entstand dadurch, dass die Probanden den Trigger bei Kontakt des Endanschlags mit dem Beton loslassen mussten. Wurde der Trigger zu spät losgelassen, erhöhte dies fälschlicherweise die ermittelte ROP. Dies wird durch die Tatsache unterstützt, dass alle Ausreißer nur zu höheren ROPs auftraten. Weiterhin wurden die Daten mit dem Shapiro-Wilk-Test und einer zusätzlichen Überprüfung mittels Histogrammen auf Normalverteilung getestet. Der t-Test mit zwei Stichproben wurde für normalverteilte Fälle verwendet. Ansonsten wurde der Mann-Whitney-U-Test (zwei Gruppen) oder der Kruskal-Wallis-Test (> zwei Gruppen) mit anschließendem Dunn-Bonferroni-post-hoc-Test zur Abschätzung der stochastischen Wahrscheinlichkeit bei Intergruppenvergleichen angewandt.

#### **5.2.2.9 Analyse des $a_{hv}$ -Wertes**

Für die Bewertung der Vibrationen wurde die frequenzbewertete Gesamtbeschleunigung  $a_{hv}$  verwendet, die in der DIN EN ISO 5349-1 (DIN EN ISO 5349) beschrieben ist. Weiterhin wurde das Frequenzspektrum der Beschleunigung in Vorschubrichtung berechnet und ihre erste Hauptfrequenz ermittelt. Diese stellt die Schlagfrequenz dar und ist aufgrund des Getriebes des Bohrhammers direkt mit der Rotationfrequenz gekoppelt. Für die statistische Auswertung wurden die extremen Ausreißer der Daten ebenfalls mittels 90%-Winsorizing transformiert. Anschließend wurden die Daten auf Normalverteilung mit dem Shapiro-Wilk-Test und zusätzlich durch Histogramme überprüft. Bei normalverteilten Daten wurden die Einflüsse auf die Schwingungen über einen t-Test (2 Gruppen) und eine einfaktorielle Varianzanalyse (> 2 Gruppen) geprüft. Ein anschließender Tukey-Post-hoc-Test wurde verwendet, um Unterschiede zwischen Gruppen mit gleicher Varianz aufzuzeigen, während der Games-Howell-Post-Hoc-Test für Gruppen mit ungleicher Varianz verwendet wurde. Wenn die Daten nicht normalverteilt waren, wurde der Kruskal-Wallis-Test gefolgt von einem Dunn-Bonferroni-Post-hoc-Test angewendet, um stochastische Unterschiede zwischen den Gruppen zu finden.

### **5.2.3 Ergebnisse**

In diesem Unterkapitel werden zunächst die von den Probanden aufgebrauchten Querkräfte anhand der deskriptiven Statistik beschrieben sowie eine Analyse des Einflusses der Bohrrichtung und der Vorschubkraft durchgeführt. Darauf folgend werden die Abhängigkeiten der Vorschubgeschwindigkeit sowie abschließend die des  $a_{hv}$ -Wertes von den eingestellten Faktoren analysiert.

### 5.2.3.1 Analyse der Querkraft

Die von den Probanden aufgebrauchten Querkräfte waren nicht normalverteilt (Shapiro-Wilk-Test:  $p < .001$ ). Diese Aussage wurde durch die Betrachtung der Schiefe (1.318) und der Kurtosis (3.22) unterstützt, wie in Tabelle 5.6 zu sehen ist. Dort sind auch die Perzentile dargestellt. Der Median der Querkräfte lag bei 16.7 N, das 95. Perzentil bei 37.7 N. 50 % der Daten lagen zwischen 11.2 und 24.2 N. Der Maximalwert wurde mit 73.1 N angesetzt. Aus Abbildung 5.8 ist jedoch ersichtlich, dass es sich hierbei um einen einzelnen Ausreißer handelte.

Tabelle 5.6: Zusammenfassung des Ergebnisses der gemessenen Querkräfte ( $n = 229$ ) in Perzentil, Minimum sowie Maximum, Schiefe und Kurtosis (Übersetzt von Uhl et al., 2021)

	5.	6.6
	25.	11.2
<b>Perzentil [N]</b>	50.	16.7
	75.	24.2
	95.	37.7
<b>Minimum [N]</b>		4.7
<b>Maximum [N]</b>		73.1
<b>Schiefe</b>		1.318
<b>Kurtosis</b>		3.220

In Abbildung 5.8 sind die Querkräfte in Abhängigkeit von der Vorschubkraft und der Bohrrichtung dargestellt. Anhand eines Kruskal-Wallis-Tests muss auf Basis des Experiments die Hypothese, dass die Querkräfte beim horizontalen Bohren von der Vorschubkraft beeinflusst werden, verworfen werden ( $\chi^2(2) = 3.113$ ,  $p = .211$ ). Beim vertikalen Bohren nach unten konnte jedoch nachgewiesen werden, dass die Querkraft mit steigender Vorschubkraft zunimmt ( $\chi^2(2) = 35.329$ ,  $p < .001$ ). Der Median steigt von  $M(SD) = 14.5(5.7)$  N (FF = 100 N),  $M(SD) = 19.7(7.6)$  N (FF = 150 N) auf  $M(SD) = 26.4(8.7)$  N (FF = 200 N). Die von den Teilnehmern aufgebrauchten Querkräfte betragen über alle Versuche 11 – 16 % der Vorschubkraft und 13 % beim Bohren nach unten. Anschließende Post-hoc-Tests (Dunn-Bonferroni-Tests) zeigen, dass sich die Querkräfte sowohl bei einer Erhöhung von

100 N auf 150 N ( $z = -2.913, p = .011$ ) als auch bei einer Erhöhung von 150 N auf 200 N ( $z = -2.993, p = .008$ ) signifikant unterschieden. Aufgrund der Effektstärke nach Cohen (1992) konnte für beide Faktorstufenwechsel ein mittlerer Effekt angenommen werden (100 N auf 150 N:  $d = 0.69$  und 150 N auf 200 N:  $d = 0.77$ ).

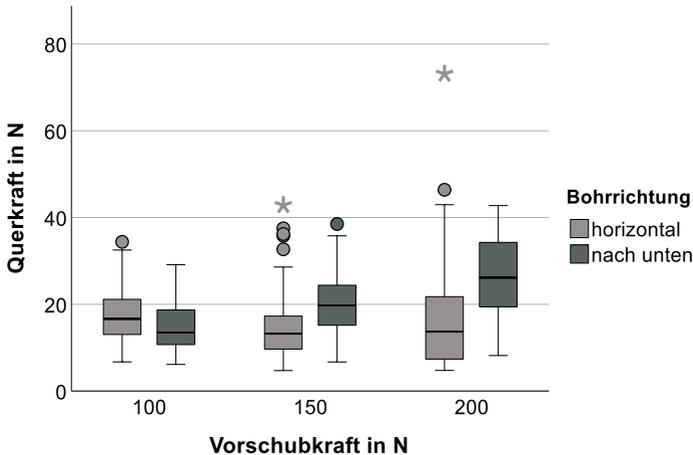


Abbildung 5.8: Gemessene Querkräfte in Abhängigkeit von der Vorschubkraft und der Bohrrichtung. Die Whisker der Boxplots enthalten IQA \* 1.5 der Daten ( $n = 229$ ). Kleine Ausreißer sind als Punkte markiert, extreme Ausreißer ( $> IQA * 3$ ) sind als Asterisks symbolisiert. (Übersetzt von Uhl et al., 2021)

Um nachvollziehen zu können, wodurch sich die Höhe der Querkräfte bei unterschiedlichen Vorschubkräften veränderte, werden im nachfolgenden die Andruckkräfte je Griff analysiert. In der Abbildung 5.9 sind die Verhältnisse der aufgetragenen Andruckkräfte des Hauptgriffs gegenüber dem Seitengriff abgebildet. Entsprechend der Abbildung 5.8 werden wiederum die Bohrrichtungen bzw. die Vorschubkraft getrennt betrachtet. Der Median des Verhältnisses in horizontaler Bohrrichtung blieb in etwa konstant (100 N:  $Mdn = 3.1$ , 150 N:  $Mdn = 3.1$ , 200 N:  $Mdn = 3.7$ ). Wohingegen dieser beim vertikalen nach unten Bohren deutlich abnahm (100 N:  $Mdn = 3.5$ , 150 N:  $Mdn = 2$ , 200 N:  $Mdn = 1.6$ ). Somit wurde hierbei eine höhere Andruckkraft über den Seitengriff aufgebracht.

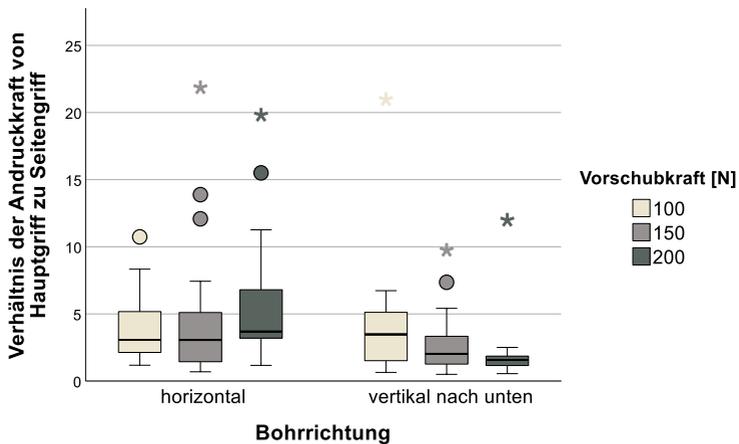


Abbildung 5.9: Verhältnis der von den Probanden aufgebrauchten Andruckkräfte zwischen dem Hauptgriff und Seitengriff in Abhängigkeit von der Vorschubkraft und der Bohrrichtung. Die Whisker der Boxplots enthalten  $IQA \cdot 1.5$  der Daten ( $n = 120$ ). Kleine Ausreißer sind als Punkte markiert, extreme Ausreißer ( $> IQA \cdot 3$ ) sind als Asterisks symbolisiert.

### 5.2.3.2 Korrelationsanalyse der Querkraft mit den abhängigen Variablen

In diesem Unterkapitel wurde mit Hilfe einer Korrelationsanalyse bewertet, ob beim manuellen Hammerbohren mit professionellen Anwendern eine Korrelation zwischen der Querkraft und den abhängigen Variablen ROP,  $a_{HV}$ -Werte am Hauptgriff und Seitengriff sowie der Schlagfrequenz besteht. Diese Untersuchung ermöglicht eine Abschätzung, ob die auf dem Prüfstand erzielten Ergebnisse plausibel sind und welche der abhängigen Variablen auch in den folgenden Studien untersucht werden sollten. Da bekannt ist, dass der Faktor Vorschubkraft die abhängigen Variablen beeinflusst, wurde eine partielle Korrelation durchgeführt. Da die Querkraft in diesem Experiment nicht eingestellt wurde, können lediglich Korrelationen und keine Kausalitäten nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse (Tabelle 5.7) zeigen, dass bei einer Erhöhung der Querkraft die Werte der Größen ROP,  $a_{HV}$ -Wert am Hauptgriff sowie die Schlagfrequenz

abnehmen. Diese Größen besaßen einen niedrigen negativen Zusammenhang mit der Querkraft. Für diese Korrelationen konnte für alle drei Größen eine Signifikanz nachgewiesen werden. Lediglich für die Beziehung zwischen der Querkraft und dem  $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse konnte keine signifikante Korrelation aufgezeigt werden. Die untersuchten Daten zeigen einen sehr geringen Anstieg der  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse bei einem Anstieg der Querkräfte.

Tabelle 5.7: Ergebnis der partiellen Korrelationsanalyse zwischen der Querkraft und den abhängigen Variablen ROP,  $a_{hv}$ -Werte am Hauptgriff und Gehäuse sowie der Schlagfrequenz. Der gemessene Median der Vorschubkraft wurde als Kontrollvariable angegeben.

		ROP	$a_{hv}$ H	$a_{hv}$ G	$f_s$
QK	Korrelation	-.204	-.334	.047	-.224
	Signifikanz (zweiseitig)	.025	< .001	.609	.014
	N	119	119	119	119

### 5.2.3.3 Analyse von Einflussgrößen auf die Vorschubgeschwindigkeit

Bevor mit der Überprüfung der Normalverteilung der Daten begonnen wurde, mussten zunächst extreme Ausreißer eliminiert werden. Da bei den Ausreißern kein offensichtlicher Fehler gefunden wurde (3 von 229 Datenpunkten), wurden die Ausreißer nicht entfernt. Stattdessen wurde eine 90 %-Winsorizing durchgeführt. Mit dem Shapiro-Wilk-Test ( $p > .05$ ) konnte festgestellt werden, dass die Gruppen für Bohrerartyp und Bohrerdurchmesser annähernd normalverteilt waren. Für die Vorschubkraft und den Bohrerdurchmesser konnte dies nicht nachgewiesen werden. Da eine Normalverteilung nicht für alle Untergruppen nachgewiesen werden konnte, wurde die Korrelation zum ROP für jeden Faktor separat berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.10 zusammengefasst.

### Einfluss der Bohrrichtung auf die ROP

Mit einem Mann-Whitney-U-Test wurde analysiert, ob es Unterschiede im ROP zwischen dem horizontalen Bohren und vertikalen nach unten Bohren gibt. Dabei wurde ein statistisch signifikanter Unterschied im Median der ROP zwischen

horizontalem ( $Mdn = 8.1$  mm/s) und vertikal abwärts gerichtetem ( $Mdn = 7.3$  mm/s) Bohren von  $U = 4904,50$ ,  $z = -3.291$ ,  $p < .001$  gefunden. Zusätzlich konnte anhand des Korrelationskoeffizienten eine schwacher Effekt  $r = -.20$  nachgewiesen werden.

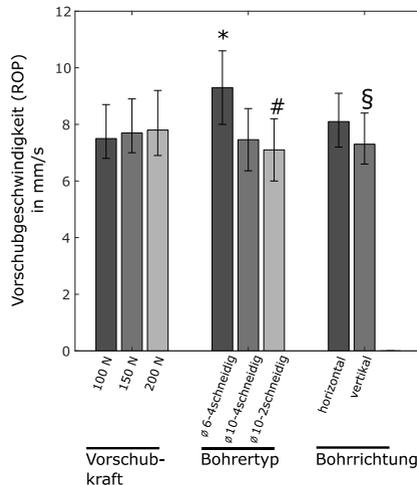


Abbildung 5.10: Ergebnisse der Vorschubgeschwindigkeit für die unterschiedlichen Vorschubkräfte ( $Mdn \pm 25. / 50.$  Quantile; n. s.), Bohrer ( $M \pm SD$ ; # $p < .05$  and \* $p < .001$  vs. D10-4-Schneider) und Bohrrichtungen ( $Mdn \pm 25. / 50.$  Quantile; § $p < .001$ ) (Übersetzt von Uhl et al., 2021)

### Einfluss des Bohrertyps auf die ROP

Zur Untersuchung des Einflusses des Bohrertyps wurden nur die Versuche des Bohrers mit einem Durchmesser von 10 mm ausgewertet, um einen Einfluss der Bohrerdurchmesser auszuschließen. Die Ergebnisse des t-Tests mit zwei Stichproben zeigten, dass ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der ROP von Bohrern mit zwei Schneidkanten ( $M = 7.1$  mm/s) und vier Schneidkanten bestand, wobei der Unterschied in der mittleren ROP bei Bohrern mit zwei Schneidkanten um 0.36 mm/s (95%-CI[0.015, 0.7]) geringer war. Dies stimmte mit den Testergebnissen  $t(155) = 2.060$  und  $p < .041$  überein. Die Effektstärke nach Cohen (1992) entsprach einer kleinen Effektgröße ( $r = .16$ ).

### **Einfluss des Bohrerdurchmessers auf den ROP**

Zur Untersuchung des Einflusses des Bohrerdurchmessers wurden nur die vierschneidigen Bohrer ausgewertet, um den Einfluss durch den Bohrertyp zu eliminieren. Mittels eines zweistufigen t-Tests konnte gezeigt werden, dass ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der ROP bei einem Bohrerdurchmesser von 6 mm ( $M = 9.3$  mm/s) und von 10 mm bestand, wobei der Unterschied in der mittleren ROP bei Bohrern mit einem Durchmesser von 10 mm um 1.83 mm/s (95%-CI [1.45, 2.21]) geringer war, was zu  $t(150) = 9.572$ ,  $p < .001$  führte. Die Effektstärke nach Cohen (1992) betrug  $r = .78$  und entsprach damit einer großen Effektgröße.

### **Einfluss der Vorschubkraft auf die ROP**

Auf Basis eines Kruskal-Wallis-Tests konnte nicht bestätigt werden, dass sich die ROP bei Variation der Vorschubkraft veränderte ( $\chi^2(2) = 11.977$ ,  $p = .482$ ). Die mittleren Ränge der einzelnen Faktorstufen 100 N:  $MR = 107.8$ , 150 N:  $MR = 116.9$  und 200 N:  $MR = 120.3$  zeigten jedoch einen steigenden Trend mit zunehmender Vorschubkraft. Es wurde eine Potenzanalyse ( $1-\beta = 0.8$ ,  $\alpha = 0.05$ ,  $\mu_A = 7.7$ ,  $\mu_B = 8.0$ ,  $\sigma = 1.51$ ) mit den ROP-Mittelwerten ( $M = [7.7$  mm/s,  $7.9$  mm/s und  $8.0$  mm/s]) und der Standardabweichung ( $SD = [1.44$  mm/s,  $1.36$  mm/s,  $1.51$  mm/s]) der einzelnen Kraftstufen durchgeführt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass zum Nachweis eines signifikanten Einflusses der Vorschubkraft unter Annahme einer Normalverteilung 397 Versuche erforderlich wären, bei denen nur die beiden Extremwerte der Vorschubkraft variiert werden würden.

#### **5.2.3.4 Analyse von Einflussgrößen auf die $a_{hv}$ -Werte**

Die Ergebnisse der  $a_{hv}$ -Werte für den Haupt- und Seitengriff für die drei vorgegebenen Faktorstufen der Vorschubkraft sind in Abbildung 5.11 in Form eines Boxplots dargestellt. Ein Shapiro-Wilk-Test zeigte, dass die  $a_{hv}$ -Werte keine Normalverteilung aufwiesen. Auf Basis der anschließend durchgeführten Analyse konnte kein Einfluss der Bohrrichtung auf den  $a_{hv}$ -Wert am Hauptgriff beobachtet werden. Ein signifikanter Einfluss, mit einer mittleren Effektgröße, war jedoch am Seitengriff für 100 N und 150 N zu beobachten. Am Seitengriff waren die  $a_{hv}$ -Werte beim nach unten Bohren höher als beim horizontalen Bohren. Die Bohrrichtung hatte auf die Schlagfrequenz ebenfalls keinen Einfluss

Für beide Griffe führte eine Erhöhung der Vorschubkraft zu einer Abnahme des  $a_{hv}$ -Wertes. Dies konnte mit Hilfe eines Kruskal-Wallis-Tests nachgewiesen werden. Beim horizontalen Bohren ergab der Dunn-Bonferroni-Post-hoc-Test, dass sich nur bei einer Vorschubkraftänderung von 100 N auf 200 N die  $a_{hv}$ -Werte am Hauptgriff

mit einer mittleren Effektstärke ( $r = .27$ ) unterschieden. Am Seitengriff war für alle Vorschubkraftänderungen ein Einfluss mit mittlerer (100 N auf 150 N:  $r = .37$ , 150 N auf 200 N:  $r = .41$ ) und großer Effektstärke (100 N auf 200 N:  $r = .79$ ) zu beobachten. Beim vertikalen Bohren führte eine Änderung von 100 N auf 200 N zu einer Änderung des  $a_{HV}$ -Wertes am Hauptgriff mit einer großen Effektstärke ( $r = .46$ ). Am Seitengriff hatte eine Änderung der Vorschubkraft einen mittleren (100 N auf 150 N:  $r = .34$ ) bis großen Effekt (150 N auf 200 N:  $r = .46$ , 100 N auf 200 N:  $r = .82$ ) auf die  $a_{HV}$ -Werte beim vertikalen Bohren.

Während die Schlagfrequenz der Bohrhämmer für beide Bohrrichtungen ähnlich war, zeigte eine Analyse mittels des Kruskal-Wallis-Tests einen Einfluss der Vorschubkraft auf die Schlagfrequenz ( $H(2) = 41.4$ ,  $p < .001$ ). Bei steigender Vorschubkraft sank die Schlagfrequenz um ca. 1.5 Hz von  $Mdn = 67.4$  Hz (bei 100 N) auf  $Mdn = 65.9$  Hz (bei 200 N). Ein Post-hoc-Test ergab einen Einfluss für alle Vorschubkraftkombinationen mit einer mittleren bis großen Effektstärke (100 N bis 150 N:  $p = .005$ ,  $r = .23$ , 150 N bis 200 N:  $p = .004$ ,  $r = .23$ , 100 N bis 200 N:  $p < .001$ ,  $r = .47$ ). Die gesamte statistische Auswertung ist im Anhang A Tabelle A.2 und Tabelle A.1 beschreiben.

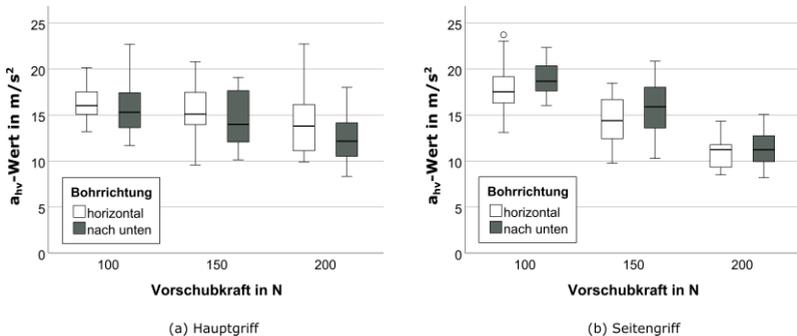


Abbildung 5.11: Frequenzbewertete Beschleunigung  $a_{HV}$  am Hauptgriff (a) und Seitengriff (b) unterteilt in Bohrrichtung und der Vorschubkraft. Die Whisker der Boxplots enthalten  $IQA \cdot 1.5$  der Daten ( $n = 120$ ). Kleine Ausreißer sind als Punkte markiert, extreme Ausreißer ( $> IQA \cdot 3$ ) sind als Asterisks symbolisiert. (Übersetzt von Lindenmann et al., 2021)

## 5.2.4 Diskussion

Das Ziel der durchgeführten Studien war es, die auftretenden Querkräfte zu untersuchen. Zusätzlich dienten die Versuche zur Erzeugung von Referenzdaten zur Verifikation der nachfolgenden Versuchsumgebung. Die Ergebnisse der Einflussanalyse auf die Größen Vorschubgeschwindigkeit sowie der ROP werden in diesem Kapitel gegenüber dem Stand der Forschung diskutiert und erläutert wie auftretende Effekte zu erklären sind. Dieses Wissen hilft auch die weiteren Ergebnisse in dieser Arbeit besser interpretieren zu können. Der Abgleich der Ergebnisse mit den Daten der prüfstandbasierten Studie findet in Kapitel 8 statt.

### 5.2.4.1 Analyse der Querkraft

In dieser Studie wurde analysiert, ob die 15 Probanden bei unterschiedlichen Anwendungen Querkräfte beim Arbeiten mit einem Bohrhämmer aufbrachten. Es wurde festgestellt, dass der professionelle Anwender beim Hammerbohren Querkräfte aufbringt. Diese sind abhängig von der Bohrrichtung und der Vorschubkraft. Der Vergleich der Ergebnisse der Vor- und Hauptstudie zeigte, dass das Verhältnis der vom professionellen Anwender aufgebrachten Querkräfte zur Vorschubkraft (11 – 16 %) fast doppelt so hoch war als in der Vorstudie (6 – 9 %). Ebenso war das 95. Perzentil der Querkräfte in der Hauptstudie mit den professionellen Anwendern höher. Der Unterschied könnte auf die geringe Anzahl an Probanden in der Vorstudie zurückzuführen sein oder auf das visuelle Feedback der Vorschubkraft, die den Anwender leicht beeinflussen könnte. Eine weitere bemerkenswerte Übereinstimmung zeigte sich bei der Betrachtung der einzelnen Bohrrichtungen. In der Vorstudie änderten sich die Querkräfte bei unterschiedlichen Vorschubkräften im Gegensatz zur Hauptstudie beim horizontalen Bohren nicht signifikant. Beim vertikalen Bohren nach unten stiegen die Querkräfte mit zunehmender Vorschubkraft ebenfalls deutlicher an. Dieser Effekt kann anhand des Verhältnisses der Andruckkräfte der beiden Griffe erklärt werden. Hierbei war zu erkennen, dass beim horizontalen Bohren die Vorschubkraft hauptsächlich am Hauptgriff angreift, während sich der Anwender beim vertikalen Bohren nach unten mit steigender Vorschubkraft stärker auf beide Handgriffe stützt.

Anhand der beiden durchgeführten Studien lässt sich erkennen, dass beim Hammerbohren Querkräfte auftreten. Es ist jedoch unbekannt, ob diese Querkräfte den Bohrprozess beeinflussen. So werden viele Studien zur Belastung des Menschen durch Vibrationen, Staub oder Lärm (Antonucci et al., 2017; Cronjäger et al., 1984; Rempel, Barr et al., 2019) an Prüfständen untersucht. Die verwendeten Prüfstände berücksichtigen das Schwingungsverhalten des Menschen in einer translatorischen Richtung. In diesen Versuchen werden jedoch nur Vorschubkräfte aufgebracht. Hecker (1983) zeigte, dass Biegeschwingungen im Bohrer zu

dynamischen Querkräften führen können, die wiederum die Geräuschabstrahlung beeinflussen. Es ist daher gut möglich, dass auch die vom Anwender statisch aufgebrauchten Querkräfte einen Einfluss haben und untersucht werden sollten. Es ist davon auszugehen, dass bei einem manuellen Versuch, bei dem eine Versuchsperson sowohl die Vorschubkraft, Greifkraft als auch die Querkräfte einstellen muss, die Versuchsperson überfordert ist. Aus diesem Grund sollten diese Untersuchungen auf Prüfständen durchgeführt werden.

#### **5.2.4.2 Korrelationsanalyse der Querkraft mit den abhängigen Variablen**

Anhand der Daten aus der Hauptstudie wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Hierbei wurde die Korrelation zwischen der Querkraft und den Bewertungsgrößen  $a_{hv}$ -Werte, ROP und Schlagfrequenz betrachtet. Auf Basis des Ergebnisses kann eine Abschätzung getroffen werden, ob es Sinn ergibt die  $a_{hv}$ -Werte, ROP und Schlagfrequenz weiter zu untersuchen. Noch wichtiger ist jedoch das Wissen über die Korrelationen, um die Gültigkeit von Effekten, welche in den weiteren Studien erforscht wurden, bewerten zu können.

Der aufgezeigte negative Zusammenhang der Querkraft mit den Größen ROP und Schlagfrequenz kann durch die höhere Belastung am Bohrer und dadurch auftretende Reibung erklärt werden (Hecker, 1983). Dies gilt es jedoch zu überprüfen. Im Gegensatz zum  $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse besteht zwischen der Querkraft und dem  $a_{hv}$ -Wert am Hauptgriff ein Zusammenhang. Diese Beobachtungen könnten auf die Schwingungsentkopplung zurückgeführt werden oder durch Interaktionseffekte mit weiteren Größen, welche in dem Experiment nicht konstant gehalten wurde.

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass zwar eine negative Korrelation nachgewiesen werden konnte, diese jedoch eher niedrig war. Somit kann für die weiteren Untersuchungen angenommen werden, dass die Querkraft zwar einen Einfluss hat, dieser jedoch eher gering ausfällt. Wie sich in den späteren Untersuchungen zeigte, bestätigte sich dies für die ROP. Bei der Analyse des  $a_{hv}$ -Werts konnten jedoch große Effektstärken nachgewiesen werden.

#### **5.2.4.3 Analyse von Einflussgrößen auf die Vorschubgeschwindigkeit**

Gemäß der zweiten Forschungsfrage in dieser Studie wurden die Einflüsse der Faktoren Vorschubkraft, Bohrrichtung, Bohrertyp und Bohrerdurchmesser in einem manuellen Experiment untersucht. Es wurde nachgewiesen, dass die Bohrrichtung und der Bohrertyp die ROP beeinflussen. Weiterhin wurde festgestellt, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Bohrerdurchmesser und der ROP

besteht. Für die Vorschubkraft konnte dies nicht nachgewiesen werden. Jedoch war ein Trend in den Daten zu sehen.

In dieser Studie wurde zum ersten Mal der Einfluss der Bohrrichtung auf die ROP untersucht. Die erhöhte ROP beim horizontalen Bohren gegenüber dem vertikalen Bohren nach unten lässt sich z. B. durch den leichteren Abtransport von Bohrmehl erklären. Das bedeutet, dass sich weniger Bohrmehl im Schlagkontakt befindet und somit eine bessere Energieübertragung vom Bohrer auf den Beton möglich ist. Des Weiteren ist beim Abwärtsbohren aufgrund der erhöhten Reibung, die durch das Bohrmehl zwischen Bohrer und Bohrlochwand entsteht, mit einer Reduzierung der Motordrehzahl zu rechnen (Hecker, 1983). Zusätzlich kann auch die unterschiedliche Orientierung des Bohrhammers einen Einfluss haben, da dies zu einer Veränderung der Schlagenergie führen kann. Aufgrund des Einflusses der Bohrrichtung sollte in weiteren Untersuchungen diese konstant gehalten werden.

In Bezug auf die Art der Bohrer (zwei vs. vier Schneidkanten) konnte ein Einfluss auf die Vorschubgeschwindigkeit nachgewiesen werden. Dies widerspricht den Ergebnissen von Gruner & Knoll (2000) bei denen kein Einfluss durch die Schneidenanzahl nachgewiesen werden konnte. Der Widerspruch könnte durch die damalige Neuheit von Bohrern mit vier Schneidkanten, die damit verbundene kurze Entwicklungszeit und durch die Tatsache, dass die Bohrer in den letzten 20 Jahren optimiert wurden, erklärt werden. Obwohl in dieser Studie gängige Bohrer verwendet wurden, kann aufgrund der unterschiedlichen Schneidkantengeometrien keine generelle Aussage über die ROP von vier gegenüber zwei Schneidkanten getroffen werden. Da in den nachfolgenden Studien der Bohrertyp variiert werden soll, ergibt es Sinn, die beiden hier verwendeten Bohrertypen weiter beizubehalten. Dadurch kann ein Vergleich der Ergebnisse der manuellen Versuche mit den prüfstandbasierten Versuchen erfolgen.

Hecker (1983), Botti et al. (2020) und Uhl et al. (2019) fanden heraus, dass es eine Korrelation zwischen ROP und Vorschubkraft gibt. Die Korrelation zeigt jeweils, dass mit steigender Vorschubkraft auch die ROP steigt. Obwohl diese Tendenz auch in dieser Studie zu sehen war, konnte keine Signifikanz nachgewiesen werden. Im Vergleich zur Studie von Botti et al., welche auf einem Prüfstand durchgeführt wurde, scheint es jedoch keinen Abfall der ROP bei einer Erhöhung der Vorschubkraft im Bereich von 150 bis 200 N zu geben. In dem hier durchgeführten Experiment wurden jedoch nicht ausreichend viele Faktorstufen eingestellt, um mögliche Hochpunkte zwischen 150 und 200 N detektieren zu können. Anhand der Daten ist zu erkennen, dass sich die Standardabweichung der ROP aufgrund der von den Teilnehmern eingestellten Vorschubkräfte gegenüber prüfstandbasierten Experimenten deutlich erhöht war. Daher ist ein signifikanter Unterschied nur mit

einer höheren Versuchsanzahl nachzuweisen. Die Anzahl der theoretisch berechneten Durchläufe bestätigt diese Aussage. In den Untersuchungen von Hecker und Botti et al. wurde ein Bohrerdurchmesser von 20 mm bzw. 19 mm verwendet. Die geringere ROP führt zu einer deutlich längeren Bohrzeit bei vergleichbarer Bohrtiefe. Durch die längere Bohrzeit kann der Einfluss eines Faktors, der sich auf jeden einzelnen Schlag auswirkt, durch eine längere Laufdauer besser nachgewiesen werden. Dies hängt damit zusammen, dass absolute Störgrößen hierbei relativ gesehen einen nicht so starken Einfluss haben. Die Ergebnisse zeigen, dass in weiteren Untersuchungen einerseits ein Prüfstand verwendet werden sollte, um reproduzierbare Kräfte zu gewährleisten, und andererseits ein Setup mit möglichst großem Durchmesser gewählt werden sollte. Dadurch wird eine möglichst lange Bohrzeit je Durchlauf erreicht. Aufgrund dessen wird in den nachfolgenden prüfstandbasierten Studien auf den kleineren Bohrerdurchmesser von 6 mm verzichtet. Die beiden Bohrertypen mit einem Durchmesser von 10 mm sollen jedoch beibehalten werden, um eine Vergleichbarkeit der manuellen Studie mit den automatisierten Studien gewährleisten zu können.

#### **5.2.4.4 Analyse von Einflussgrößen auf die $a_{hv}$ -Werte**

Eine Änderung der Bohrrichtung wirkte sich auf die  $a_{hv}$ -Werte am starr gekoppelten Seitengriff aus. Während der Proband beim horizontalen Bohren die gesamte Vorschubkraft aufbringen musste, wirkte sich beim vertikalen Bohren das Gewicht des Gerätes (ca. 34 N) unterstützend aus. So mussten die Anwender weniger drücken, um die vorgegebene Vorschubkraft zu erreichen, was zu einer geringeren Auslenkung der Blattfeder der Schwingungsentkopplung des Hauptgriffs und einer Reduzierung der Koppelkräfte an beiden Griffen führte. Bei höheren Auslenkungen der Feder wurde in einem Vorversuch ein Anstieg der Steifigkeit gemessen, was zu einer höheren Schwingungsübertragbarkeit führte. Im Allgemeinen waren beim vertikalen Bohren die  $a_{hv}$ -Werte am Seitengriff höher als beim horizontalen Bohren. Dies stimmt mit Jahn (1985) überein, bei dem am Hauptgriff beim vertikalen Bohren höhere  $a_{hv}$ -Werte als beim horizontalen Bohren auftraten. Da der Hauptgriff in der Studie von Jahn kein Antivibrationssystem enthielt, wird davon ausgegangen, dass die relativen Ergebnisse der Studie von Jahn mit denen des Seitengriffs aus dieser Arbeit vergleichbar sind. Die Unterschiede im Trend der  $a_{hv}$ -Werte am Hauptgriff lassen sich außerdem dadurch erklären, dass die Probanden in der Studie von Jahn angewiesen wurden, nur den Hauptgriff zu benutzen. Dies führt zu einem anderen muskulären Belastungszustand, der die Abweichungen erklären könnte. Die Versuche von Schenk & Knoll (1998) zeigten ebenfalls höhere  $a_{hv}$ -Werte am Hauptgriff beim vertikalen Bohren. Auch hier verfügte der von Schenk und Knoll verwendete Bohrer nicht über ein Antivibrationssystem am Hauptgriff. Es wird daher angenommen, dass der Einfluss der Bohrrichtung auf die Schwingung sich

durch das Vorhandensein eines Schwingungsentkopplungssystems am Hauptgriff ändert.

Durch die Erhöhung der Vorschubkraft ist eine Abnahme des  $a_{hv}$ -Wertes am Hauptgriff zu erkennen. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Jahn (1985) überein, bei dem ebenfalls ein abnehmender Trend beobachtet wurde. Der Trend der  $a_{hv}$ -Werte an beiden Handgriffen stimmt mit den Erkenntnissen von Jahn überein, bei dem ein abnehmender Trend zu höheren Vorschubkräften beobachtet wurde. Die Ergebnisse einer Studie auf einem Prüfstand von Botti et al. (2020) stehen im Widerspruch zu den Erkenntnissen dieses Experiments. Die Daten von Botti et al. zeigen, dass die  $a_{hv}$ -Werte bis zu einem bestimmten Niveau ansteigen und dann nahezu konstant bleiben. Obwohl das von Botti et al. verwendete HAM (Rempel, Barr et al., 2017) lediglich bei etwa 90 N validiert wurde, scheinen die Ergebnisse über 90 N plausibel zu sein, da sie dem allgemeinen Trend der Daten folgen. Außerdem verwendeten Botti et al. ein anderes Bohrhammer-Bohrer-Setup. Die Ergebnisse aus dieser Studie lassen im Vergleich zu den Ergebnissen von Jahn et al., Uhl et al. und Botti et al. die Vermutung zu, dass der Einfluss der Vorschubkraft auf die Bohrhammerschwingung mit dem Bohrhammer selbst (z. B. Art der Griffentkopplung, Gewicht, Schlagenergie) zusammenhängt und weiter untersucht werden muss. Wie bereits gezeigt erhöhen sich mit zunehmender Vorschubkraft die Querkräfte, die der Anwender beim Bohren nach unten auf den Bohrer ausübt. Diese Korrelation könnte den Effekt der Vorschubkraft auf die Schlagfrequenz durch die Bohrlochreibung erklären. Ein weiterer Erklärungsansatz kann anhand der Erkenntnisse von Jahn gefunden werden. Jahn erwähnte eine zunehmende Bohrlochreibung an der Bohrerspitze bei höheren Vorschubkräften. Dies geschieht, da die Bohrerspitze aus der Kerbe, die durch den vorherigen Schlag entstanden ist, herausrotieren muss, bevor der nächste Schlag erfolgt. Durch eine höhere Vorschubkraft wird diese Drehbewegung erschwert, wodurch die Drehbewegung des Antriebsstrangs des Bohrhammers und durch die mechanische Kopplung ebenso die Schlagfrequenz des Schlagwerkes reduziert wurde. Bei einer langsameren Motordrehung nimmt somit auch die Schlagleistung ab, wodurch eine Abnahme der Gehäuseschwingung erklärt werden kann. Da in dieser Studie weder die Querkraft noch das Bremsmoment gezielt eingestellt wurden, konnte anhand der Daten lediglich festgestellt werden, dass es zu einem überlagerten Effekt der Bohrerreibung kam, welcher die Vibrationswerte beeinflusste. In der nachfolgenden automatisierten Studie sollten deshalb die Vorschub- und Querkraft eingestellt und variiert werden. Wie sich weiter gezeigt hat, könnten die Einflüsse auf die Vibrationen vom Aufbau des Bohrhammers abhängig sein. Deshalb wird in der kausalen Studie I der Bohrhammer als variierender Faktor untersucht.

## 5.3 Zusammenfassung

Anhand der explorativen Studie konnte gezeigt werden, dass beim Hammerbohren Querkräfte auftreten. Bereits beim Ansetzen des Bohrhammers auf den Beton muss durch die zur Bohrerachse exzentrisch aufgebrachte Andruckkraft bzw. durch das Gerätegewicht eine Querkraft aufgebracht werden, um ein Abrutschen des Bohrers auf dem Untergrund zu verhindern. Während dem eigentlichen Bohrvorgang entsteht durch die exzentrische Kraft ein Moment um die Bohrer Spitze. Diesem muss entweder ebenfalls durch eine Querkraft oder durch ein Moment um die Einspannung des Bohrers im Bohrloch entgegengewirkt werden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die auftretende Querkraft von der Interaktion aus Bohrrichtung und Vorschubkraft abhängt. Anhand der durchgeführten Vor- und Hauptstudie konnte nachgewiesen werden, dass die Erhöhung der Querkraft beim vertikalen nach unten Bohren durch das verstärkte Aufbringen der Andruckkraft über den Seitengriff resultiert.

Durch den Vergleich der Vor- und Hauptstudie wird deutlich, dass das Verhältnis von Querkraft zur Vorschubkraft bei den professionellen Anwendern doppelt so hoch war wie bei den Laien. Die Absolutwerte bzw. ermittelten Mediane der Querkraft waren jedoch vergleichbar. Weiterhin ist die Abhängigkeit der Querkraft von der Vorschubkraft und Bohrrichtung bei den beiden Probandengruppen übertragbar. Der geringfügige Unterschied der Mediane könnte durch das freiere Arbeiten der Laien, eine andere Arbeitsweise oder einen statistischen Messfehler entstanden sein. Der Unterschied ist jedoch so klein, dass die Ergebnisse der Studie mit professionellen Anwendern Gültigkeit besitzen sollten. Die Analyse der Querkraft ergab, dass der Median aller Versuche bei 17 N, das 95. Perzentil bei 37 N und Extremwert bis zu 73 N hoch waren. Aufgrund dessen sollten in der kausalen Studie I folgende Faktorstufen für die Querkraft eingestellt werden: 0 N, 20 N, 40 N und 60 N.

Die durchgeführte Korrelationsanalyse ergab, dass in der Hauptstudie ein schwacher negativer Zusammenhang zwischen der Querkraft und den Größen Vorschubgeschwindigkeit,  $a_{HV}$ -Wert am Hauptgriff und Schlagfrequenz vorlag. Dieses Wissen kann für die Bewertung der prüfstandbasierten Versuche genutzt werden, indem die Ergebnisse des prüfstandbasierten Hammerbohrens mit den Ergebnissen der Korrelationsanalyse des manuellen Hammerbohrens plausibilisiert werden.

Die Variation von verschiedenen Faktoren soll bei der Plausibilisierung eine gewisse Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf unterschiedliche technische Systeme unterstützen. Durch die Änderung des Faktors Vorschubkraft konnte lediglich eine

Tendenz hinsichtlich der Änderung der ROP aufgezeigt werden. Wohingegen für die  $a_{hv}$ -Werte ein signifikanter Unterschied aufgezeigt werden konnte. In Abhängigkeit der Prüfstandergebnisse sollte deshalb in der Verifikationsstudie die Vorschubkraft ebenfalls eingestellt werden. Durch die durchgeführte Hauptstudie konnte erstmalig im wissenschaftlichen Umfeld gezeigt werden, dass die Bohrrichtung einen Einfluss auf die ROP hat. Der im aktuellen Stand der Forschung beschriebene Einfluss der Bohrrichtung auf den  $a_{hv}$ -Wert konnte ebenfalls bestätigt werden. Da ein Einfluss der Bohrrichtung in Interaktion mit der Vorschubkraft lediglich beim vertikal nach unten Bohren besteht und das HAM von Cronjäger nur für dieses ausgelegt wurde, wird in den kausalen Studien nur diese Bohrrichtung betrachtet. Auf Basis der Ergebnisse der Faktoren Bohrerdurchmesser und Bohrertyp kann geschlossen werden, dass ein größerer Durchmesser gewählt werden sollte sowie der Bohrertyp einen Einfluss auf die ROP und die Bohrhammervibrationen hat und somit als Faktor mitberücksichtigt werden sollte. Diese Maßnahme soll dazu führen, große Absolutwertunterschiede der abhängigen Variablen durch Faktorvariationen erhalten zu können.

Für die nachfolgenden kausalen Studien sollen die Einflüsse des Anwenders möglichst reproduzierbar sein. Neben der Querkraft sind dies die Greifkraft, Vorschubkraft sowie die Schwingungscharakteristiken. Da es Probanden schwerfällt, alle Größen gleichzeitig einzustellen, wird ein Prüfstand mit einem Ersatzmodell des Menschen eingesetzt, welcher diese Kräfte gezielt einstellen bzw. konstant halten kann. Dadurch kann die Versuchsanzahl stark reduziert werden. Dies macht es jedoch notwendig eine Verifikationsstudie durchzuführen, bei welcher gezielt für ein Bohrhammer-Bohrer-Setup manuell Querkräfte aufgebracht werden. Dadurch kann verglichen werden, ob die auf dem Prüfstand gewonnenen Erkenntnisse über den Einfluss der Querkraft auf die ROP und den  $a_{hv}$ -Wert auch auf das manuelle Hammerbohren übertragbar sind. Im Zuge der Diskussion dieser Verifikationsstudie werden die Ergebnisse der explorativen Studie hinsichtlich der Einflüsse der Vorschubkraft und ihr Interaktionseffekt mit der Querkraft auf die Größen  $a_{hv}$ -Wert, Schlagfrequenz und ROP im Vergleich zu den Ergebnissen der prüfstandbasierten Studien diskutiert.

## 6 Querkrafteinfluss auf Produktivität und Vibrationen (Kausale Studie I)

Das Ziel dieser Studie ist es, den Zusammenhang zwischen der Querkraft und weiteren Einflussfaktoren auf die Größen Vorschubgeschwindigkeit und  $a_{HV}$ -Wert zu ermitteln. Aufgrund dessen wird die Querkraft in diesem Experiment mehrstufig eingestellt. Neben der Querkraft werden die Vorschubkraft, der Bohrhammer sowie der Bohrertyp variiert. Da beim Hammerbohren die Vorschubkraft stark variieren kann, wird diese ebenfalls bei mehreren Faktorstufen untersucht.

In der explorativen Studie konnte ermittelt werden, in welcher Höhe die Probanden Querkräfte aufgebracht haben. Die gewählten Faktorstufen in der kausalen Studie I orientieren sich an dem gemessenen Median, dem 95. Perzentil sowie an den Ausreißern. Des Weiteren konnte anhand der Vorstudie aus Kapitel 5.1 die Richtung der Querkraft bestimmt werden. Mittels der Analyse der Häufigkeit der aufgetretenen Richtung der Querkraft in diesen Experimenten sowie des Auslenkungsspielraums des Bohrhammers im HAM, wurde die Querkraftrichtung für diese Studie bestimmt. Um eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuchsrandbedingungen zu erreichen, wurden die Versuche auf einem Prüfstand durchgeführt. Aufgrund dessen wird in diesem Kapitel neben den eigentlichen Ergebnissen ein Schwerpunkt auf die Beschreibung des Versuchsaufbaus und insbesondere der Charakterisierung der Regelung gelegt.

*Teile des methodischen Vorgehens (außer dem Unterpunkt: Charakterisierung der Regelung), die Ergebnisse und die Diskussion bezüglich der Bewertungsgröße Bohrhammervibrationen dieses Kapitels basieren auf der Veröffentlichung:*

*„Factors on Vibrational Harm during Hammer Drilling – Influences of Lateral Force, Feed Force, Hammer Drill and Drill Bit Type”, (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2022)*

*Die Ergebnisse und die Diskussion bezüglich der Bewertungsgröße Produktivität dieses Kapitels basieren auf der Veröffentlichung:*

*„Does the User Behavior effect the Productivity of Hammer Drilling? – Analysis of the Influences of Feed and Lateral Force”, (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2022)*

*Abbildungen und Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus den beiden Veröffentlichungen übernommen. Im Gegensatz zu den Abbildungen werden die Texte aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.*

## 6.1 Fragestellungen

In diesem Kapitel soll die folgende Hauptfrage untersucht werden:

*FF 3: Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Querkraft und den Größen Vorschubgeschwindigkeit sowie  $a_{hv}$ -Wert unter Berücksichtigung der Vorschubkraft, des Bohrhammers und Bohrertyps?*

Um zeigen zu können, ob die gewonnenen Erkenntnisse in einem gewissen Rahmen übertragbar sind, wird neben der Querkraft auch die Vorschubkraft sowie der Bohrhämmer und der Bohrertyp variiert. Für die Untersuchung der Zusammenhänge wird für die Untersuchung der beiden Bewertungsgrößen ein gemeinsames Experiment genutzt. Die Präsentation der Ergebnisse und anschließende Diskussion wird für eine übersichtliche Darstellung getrennt voneinander behandelt. Bezogen auf die Bewertungsgröße Vorschubgeschwindigkeit sollen folgende Fragen erforscht werden:

- *Welche Zusammenhänge bestehen zwischen der Quer- sowie Vorschubkraft und der Vorschubgeschwindigkeit?*
- *Sind diese Zusammenhänge auf unterschiedliche Bohrhämmer und Bohrertypen übertragbar?*

Die Fragen zur Untersuchung der Einflüsse auf den  $a_{hv}$ -Wert lauten wie folgt:

- *Welche Zusammenhänge bestehen zwischen der Quer- sowie Vorschubkraft und dem  $a_{hv}$ -Wert?*
- *Sind diese Zusammenhänge auf unterschiedliche Bohrhämmer und Bohrertypen übertragbar?*

Um diese Fragen zu beantworten, werden die ermittelten Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses der Querkraft sowie den Interaktionseffekten der Querkraft mit den weiteren Faktoren diskutiert. Zusätzlich werden die Haupteffekte der Faktoren Vorschubkraft, Bohrhämmer und Bohrertyp analysiert. Durch einen Vergleich dieser Haupteffekte mit der explorativen Studie und dem Stand der Forschung kann aufgezeigt werden, ob mit Hilfe des Prüfstands ein realistisches Verhalten des Bohrhammers abgebildet wird.

## 6.2 Methodisches Vorgehen

In diesem Unterkapitel werden der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die Datenauswertung beschrieben. Ein besonderer Fokus wird auf die Charakterisierung der Regelung gelegt.

### 6.2.1 Versuchsaufbau

In diesem Versuch wurden zwei unterschiedliche Bauarten an Bohrhämmern verwendet. Der Bohrhämmer der Firma Bosch (Modell GBH 3-28 DRE, Robert Bosch Power Tools GmbH, Leinfelden-Echterdingen) verfügte über ein Schlagwerk mit einem Winkelgetriebe und einem Taumellager zur Realisierung des Schlages. Laut Hersteller betrug der Schwingungswert  $a_{hv}$ -Wert =  $14,5 \pm 1,6 \text{ m/s}^2$  und die Einzelschlagenergie 3,1 J. Der zweite Bohrhämmer von Hilti (Modell TE 30-AVR, Hilti Deutschland AG, Kaufering, Deutschland) hatte ein Schlagwerk mit einem Pleuelantrieb. Der Vibrationswert wurde laut Hersteller mit  $a_{hv}$ -Wert =  $10 \pm 1,5 \text{ m/s}^2$  angegeben und die Einzelschlagenergie betrug 3,6 J. Beide Bohrhämmer hatten ein SDS-Plus-Bohrfutter. Insgesamt wurden drei verschiedene Bohrertypen verwendet. Ein Wendelbohrer von Hilti (Modell TE-CX 10/22 MP8, Hilti Deutschland AG, Kaufering, Deutschland) hatte einen Durchmesser von 10 mm und vier Schneidkanten. Der zweite Bohrer war ein Wendelbohrer der Firma ALPEN-MAYKESTAG (Modell SDS-plus F4 Forte, ALPEN-MAYKESTAG GmbH, Puch, Österreich), mit zwei Schneidkanten. Er hatte ebenfalls einen Durchmesser von 10 mm. Weiterhin wurde ein Hohlbohrer mit zwei Schneidkanten und einem Durchmesser von 14 mm verwendet (Modell FHD 14/250/380, fischerwerke GmbH & Co. KG, Waldachtal, Deutschland). Die Bohrer mit einem Durchmesser von 10 mm wurden ausgewählt, um die auf dem Prüfstand erzielten Ergebnisse mit denen aus dem Kapitel 5.2 vergleichen zu können. Da jedoch zusätzlich zu den beiden Wendelbohrern ein Hohlbohrer untersucht werden sollte und dieser erst ab 14 mm Durchmesser verfügbar war, musste ein größerer Durchmesser gewählt werden. In dieser Studie wurden die Ergebnisse der einzelnen Bohrertypen nicht direkt miteinander verglichen, sondern nur die qualitativen Verläufe. Es wurde ein genormter Beton mit C 20/25 (Betonprüfkörper C 20/25, Rau-Betonfertigteile, Ebhausen, Deutschland) mit einer Mindestdruckfestigkeit von  $25 \text{ N/mm}^2$  und der Abmessung 2145 mm x 1200 mm x 200 mm verwendet. Die Aushärtedauer des Betonblocks betrug mindestens 28 Tage.

Der Versuch wurde auf einem automatisierten Prüfstand mit einem Industrieroboter (siehe Position 1 in Abbildung 6.1 Modell KR 500 R2830 MT, KUKA, Augsburg, Deutschland) durchgeführt. Der Bohrhämmer (4) wurde mit einem HAM (6) nach

(Cronjäger et al., 1984; Jahn & Hesse, 1986) sowie einem mehrachsigen Kraft-Momenten-Sensor (siehe Position 2 in Abbildung 6.1, Modell NET FT Omega 160-IP65, ATI, Apex, NC, USA) am Flansch des Roboters montiert. Ein Absaugsystem (3) wurde verwendet, um den Staub aus der Umgebungsluft zu entfernen. Für Versuche mit Hohlbohrern wurde ein Staubsauger von Festool (Absaugmobil CLEANTEC CTL 26 E, Festool GmbH, Wendlingen, Deutschland) verwendet. Der Aufbau des Prüfstandes sowie das zugehörige Koordinatensystem sind in Abbildung 6.1 dargestellt.

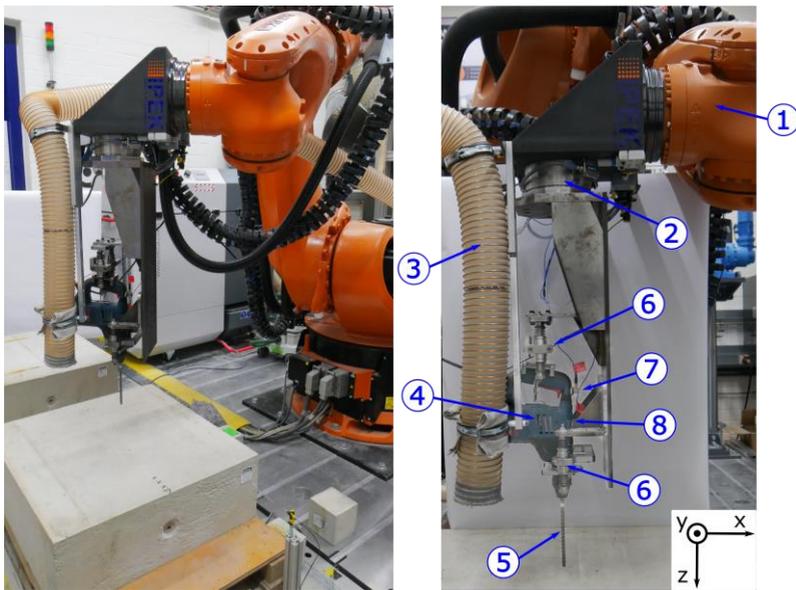


Abbildung 6.1: Roboterbasierter Versuchsaufbau der kausalen Studien. (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2022)

Zur Messung der Bohrhammerschwingungen wurden zwei Beschleunigungsaufnehmer (Modell 356A02, PCB Piezotronics, Depew, NY, USA) verwendet. Der erste Beschleunigungsaufnehmer (7) befindet sich an der in der DIN EN ISO 28927-10 (DIN EN ISO 28927-10) für den Hauptgriff definierten Position. Da das verwendete HAM die Montage des Seitenhandgriffs verhinderte, konnte der zweite Beschleunigungsaufnehmer (8) nicht an der in der Norm definierten Position

angebracht werden und wurde stattdessen am Bohrhammergehäuse in der Nähe der Position des Seitenhandgriffs montiert. Des Weiteren wurden zwei Temperatursensoren (TJC100-ICSS-M050U-150, OMEGA Engineering GmbH, Deckenpfronn, Deutschland) verwendet, um die Temperaturen des Bohrhammers und der Bohrspitze zu messen. Die Temperatur des Bohrhammers wurde am Gehäuse des Schlagwerks gemessen. Zur Erfassung der Daten wurde ein Echtzeitsystem (ADwin-Pro II, Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH, Lorsch, Deutschland) mit einer Abtastfrequenz von 12500 Hz eingesetzt.

### **Charakterisierung der Regelung**

Während dem eigentlichen Bohrvorgang wurde die Roboterbewegung in allen Raumrichtungen durch eine Kraftregelung realisiert. Hierfür wurden die Daten aus dem Kraft-Momenten-Sensor (Modell NET FT Omega 160-IP65, ATI, Apex, NC, USA) genutzt. Die Regelung selbst wurde mittels der Robot Sensor Interface (RSI) von KUKA entwickelt. Die Sollwertvorgabe, beispielsweise der Kräfte sowie der Bohrtiefe, wurde über EtherCat vom Echtzeitsystem ADwin (ADwin-Pro II, Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH, Lorsch, Deutschland) vorgegeben. Die RSI-Regelung wurde auf die schnellstmögliche Taktzeit von 4 ms (250 Hz) eingestellt. Die Regelung mit Regelungsparametern ist in der Abbildung 6.2 dargestellt. Sie bestand im Wesentlichen aus einem PT1- und I-Glied sowie einer Vorsteuerung. Der I-Anteil in der Regelung war notwendig, da sonst aufgrund des un stetigen Abtragverhaltens von Beton die gewünschte Sollkraft im Mittel nicht bzw. eine schlechte stationäre Genauigkeit erreicht werden würde. Der Einsatz eines PT1-Gliedes wurde benötigt, damit durch die große Masse des Endeffektors der Roboter bei hohen Beschleunigungen nicht aussetzte bzw. zu stark belastet wurde. Die eingesetzte Vorsteuerung wirkte zu Beginn der Bohrung. Sie sorgte dafür, dass für einen definierten Zeitraum ein größerer Weg gestellt wurde und somit die Federn des HAM schneller komprimiert wurden. Dadurch wurde die Sollkraft schneller erreicht. Die Stellgröße war der Stellweg des Roboters bezogen auf den Tool-Center-Point (TCP).

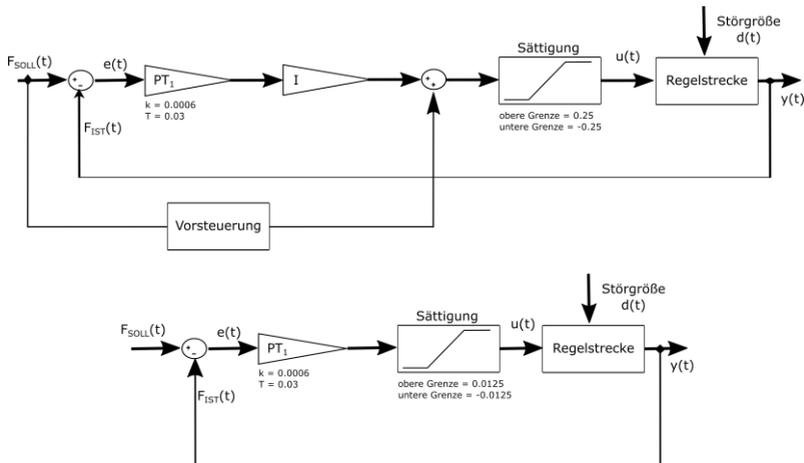


Abbildung 6.2: Abbildung der Regelungsstruktur anhand der Blockdarstellung für die Vorschubrichtung (oben) und den beiden Querkraftrichtungen (unten)

Zur Charakterisierung der Regelung bzw. des Systemverhaltens sollen die Sprungantworten der Vorschubkraft und Querkraft herangezogen werden. Da sich der Systemzustand durch das Abtragen des inhomogenen Untergrundes ständig ändert, wird bezüglich der Vorschubkraft zunächst der Bohrhämmerzustand *Motor aus* analysiert und diskutiert. Durch das Abschalten des Gerätes wird ein reproduzierbarer Zustand erzeugt, wodurch die Charakterisierung des Systems vereinfacht wird. Da jedoch die Regelung für den Zustand *Motor an* ausgelegt wurde, wird dieser Zustand ebenfalls betrachtet. In Richtung der aufgebrachtten Querkraft gibt es keinen bzw. nahezu keinen Abtragprozess, weshalb hier lediglich der Zustand *Motor an* analysiert wird. Als Bewertungsgrößen werden die Anregelzeit, die Überschwingweite sowie der Beharrungswert, welche auch in der DIN IEC 60050-351 (DIN IEC 60050-351) beschrieben sind, herangezogen und in der Abbildung 6.3 eingezeichnet. Der Toleranzbereich für die Ausschwingweite wird mit 5 % definiert. Für die Charakterisierung der Regelung wurde grundsätzlich der gleiche Versuchsaufbau verwendet, wie er auch während der Experimente genutzt wurde. In der Tabelle 6.1 sind diese nochmals aufgelistet.

Tabelle 6.1: Parameterwahl zur Durchführung der Regelungscharakterisierung

Parameter	Hersteller	Typ/Bezeichnung
Bohrhammer	Hilti	TE 30 AVR
Bohrer	Hilti	CX D10
Bohrrichtung	-	vertikal nach unten
Beton	Rau	C 20/25

Analog zu den manuellen und automatisierten Versuchen wurde der Gerätetrigger während den Untersuchungen *Gerät an* vollständig betätigt. Die angezeigten Kraftverläufe wurden mittels des FT-Sensors aufgenommen. Diese Kraftwerte wurden auch für die Regelung als Regelgröße genutzt. Folgende Versuche wurden zur Charakterisierung eingesetzt:

1. Gerät aus: Sollwertsprung der Vorschubkraft von 110 auf 160 N (a)
2. Gerät an: Sollwertsprung der Vorschubkraft von 110 auf 160 N (b)
3. Gerät an: Sollwertsprung der Vorschubkraft von 170 auf 220 N (c)

In Abbildung 6.3 sind der Zeitverlauf der Vorschubkraft während den Zuständen *Gerät aus* (a) sowie *Gerät an* (b und c) abgebildet. Die Kraftverläufe von (b) und (c) sind mit einem Tiefpassfilter 4. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 15 Hz gefiltert worden. Die Sollkraftänderungen in Vorschubrichtung besitzen eine Sprunghöhe von 50 N.

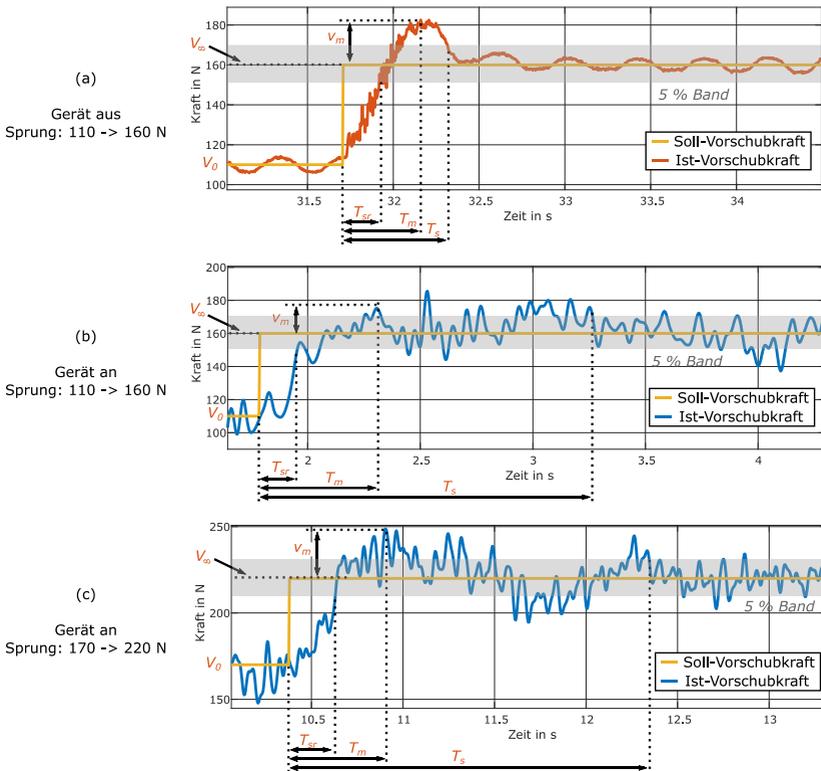


Abbildung 6.3: Sprungantworten der Vorschubkraft (blaue Kurven) von unterschiedlichen Gerätezuständen am roboterbasierten Prüfstand zur Verifikation der Regelung. In (a) Zustand Motor aus, in (b) Zustand Motor an mit Sprung der Sollkraft von 110 auf 160 N, in (c) Zustand Motor an mit Sprung der Sollkraft von 170 auf 220 N,

Anhand der Sprungantworten und den dadurch ermittelten Kennwerten (in Tabelle 6.2 zusammengefasst) konnte die Regelung quantifiziert werden. Beim Zustand *Gerät aus* ist zu erkennen, dass es zu Schwingungen vor und nach Sollkraftänderung kam. Die Regelung schien jedoch grenzstabil zu sein. Hierbei muss angemerkt werden, dass diese für diesen Zustand nicht ausgelegt wurde. Die

Schwingungen entstanden vermutlich durch die Federsteifigkeit bzw. Nachgiebigkeit im System. Weiterhin war im System eine maximale Überschwingweite mit  $v_m = 14.1\%$  nach 0.45 s zu erkennen. Das System hatte eine Anregelzeit von 0.24 s und eine Ausregelzeit von 0.61 s. Die Verzögerungszeit betrug ca. 0.2 s. Die Zustände 2 und 3 waren aufgrund des Abbauprozesses des inhomogenen Betons weniger reproduzierbar, jedoch waren diese und somit die damit einhergehenden Kennwerte zur Charakterisierung der Regelung relevanter. Beim Vergleich der gemessenen Vorschubkraftverläufe (b) und (c) in Abbildung 6.3 ist zu erkennen, dass es aufgrund des Abbauprozesses zu höherfrequenten Schwingungen kommt. Beim Betrachten der Überschwingweite sowie der Ausregelzeit scheint bei einem Sprung von 110 auf 160 N das System relativ wenig überzuschwingen, wohingegen bei 170 auf 220 N ein deutlicheres Überschwimmen zu sehen ist. Dieses Verhalten ist durch die bei 170 N stärker vorgespannten Federelemente des HAM zu erklären.

Tabelle 6.2: Kennwerte der Sprungantwort zur Verifikation der Regelung des roboterbasierten Prüfstandes für die drei betrachteten Zustände (ZS)

ZS	Anregelzeit $T_{sr}$	Überschwingweite $v_m$	Stationäre Genauigkeit $V_\infty$
a	0.24 s	182.58 N (14.1 %)	160.23 N (0.1 %)
b	0.89 s	175.25 N (9.5 %)	160.06 N (0.04 %)
c	0.26 s	246.76 N (12.2 %)	218.26 N (0.8 %)

Letztendlich soll in diesem Kapitel noch die Wiederhol- und Absolutgenauigkeit der eingestellten Kräfte analysiert werden. Diese beiden Größen werden im Bereich Robotik normalerweise für die Beschreibung der Genauigkeit von angefahrenen Positionen des TCP genutzt, sind jedoch ebenso sehr gut zur Beschreibung der Genauigkeit der erreichten Kraft anwendbar. Die Absolutgenauigkeit entspricht dem Mittelwert der stationären Genauigkeit der Einzelversuche mit gleichem Setup. Hierfür werden die Mittelwerte und Standardabweichungen sowie die stationäre Genauigkeit der geregelten Kräfte der kausalen Studie I beschrieben. Bei den untersuchten Versuchsdurchläufen wurde eine maximale Regelabweichung aller Mittelwerte von  $M = 0.4\text{ N}$  vom Sollwert erreicht. Zur Beschreibung der Wiederholgenauigkeit der eingestellten Vorschubkraft wurde die

Standardabweichung herangezogen. Diese betrug  $SD < 1.5$  N. Senkrecht zur Bohrachse betrug die maximale Standardabweichung für die auf die jeweilige Faktorstufe eingestellte Querkraft  $SD = 3.9$  N und für die senkrecht auf 0 N eingestellte Querkraft  $SD = 1$  N. Die stationäre Genauigkeit in x-Richtung bewegte sich zwischen 0.3 und 1.3 N. Die genauen Werte der deskriptiven Statistik sind in Tabelle 6.3 zu sehen.

Tabelle 6.3: Deskriptive Statistik der auf dem Prüfstand gemessenen Quer- und Vorschubkraft mit Sollwert (SW), Mittelwert des Istwerts (IW), Standardabweichung bzw. Wiederholgenauigkeit (WG), Absolutgenauigkeit (AG) und Stichprobenanzahl (n)

Faktor	SW [N]	IW [N]	WG [N]	AG [N]	n
Vorschubkraft	80	79.6	1.3	0.4	191
	110	109.8	1.4	0.2	192
	140	140.0	1.3	0	191
	170	170.3	1.4	0.3	191
	200	200.4	1.4	0.4	192
	230	230.4	1.4	0.4	190
Querkraft $x$ -DIR	0	0.6	1.3	0.6	285
	20	21.3	1.7	1.3	287
	40	40.7	3.1	0.7	288
	60	60.3	3.8	0.3	287
Querkraft $y$ -DIR	0	0	1	0	1147

In diesem Kapitel wurde die Charakterisierung der Regelung durchgeführt. Entscheidend für die nachfolgend durchgeführten Versuche ist die Absolutgenauigkeit. Weiter muss in jedem Versuch ausreichend Auswertzeit mit konstanten Randbedingungen vorliegen. Um diese bewerten zu können, kann die Ausregelzeit herangezogen werden. In den automatisierten Versuchen werden lediglich konstante Sollwerte vorgegeben. Deshalb nimmt die Ausregelzeit gegenüber der Absolutgenauigkeit eine untergeordnete Rolle ein. Die durchgeführte Charakterisierung zeigt, dass beide Kriterien ausreichend erfüllt sind.

## 6.2.2 Versuchsablauf

Um aufwendige Umrüstzeiten einzusparen und um Störeinflüsse durch Änderungen am Prüfstand zu vermeiden, wurden die Faktoren Bohrhammer und Bohrer als Blöcke betrachtet. Es wurde ein vollfaktorierter randomisierter Versuchsplan für die Vorschub- und die Querkraft mit MODDE (MODDE 12, Umetrics, Schweden) erstellt. Dieser Versuchsplan wurde für jeden Bohrer angewendet und dreimal repliziert. Für jede Wiederholung wurde ein neuer Bohrer verwendet. Nachdem alle Versuchsdurchläufe des ersten Bohrhammers durchgeführt worden waren, wurden die Versuche mit dem zweiten Bohrhammertyp abgearbeitet. Mit jedem Bohrer wurden 48 Bohrlöcher gebohrt (insgesamt 1152 Versuche). Jedes Bohrloch wurde senkrecht nach unten mit einer Tiefe von 120 mm gebohrt. Um ein mögliches Verstopfen des Bohrers im Bohrloch durch das Bohrmehl zu verhindern, gab es während dem Bohrvorgang eine Entlüftungsphase. Hierfür wurde der Bohrer auf halber Bohrtiefe um 30 mm aus dem Bohrloch zurückgeführt. Während den Versuchen mit den Hohlbohrern wurde ein Industriestaubsauger verwendet, um den Bohrstaub zu entfernen. Die Positionen der Bohrlöcher wurden auf dem Betonblock randomisiert angeordnet. Dadurch konnte ein möglicher Einfluss der herstellungsbedingten Inhomogenität der Werkstückeigenschaften reduziert werden. Während des Bohrens wurde die Position der Bohrlöcher so gewählt, dass kein Armierungseisen getroffen wurde. Die Faktoren und ihre Faktorstufen sind in Tabelle 6.4 aufgeführt.

Während des Bohrens brachte der Roboter durch eine Kraftregelung konstante Vorschub- und Querkräfte auf. Um ein seitliches Ausbrechen des Bohrers zu verhindern, wurde die Querkraft erst ab einer Bohrtiefe von 30 mm aufgebracht. Die Querkraft wurde in die positive x-Richtung (siehe Abbildung 6.1) des TCP-Koordinatensystems aufgebracht. Somit hatte der Roboter eine Führungskraft bzw. Bewegung in negativer x-Richtung vollführt. Für die Wahl dieser Belastung gab es zwei Gründe. Zum einen entstand diese bei Teilen der manuellen Versuche (siehe Abbildung 5.4) und zum anderen konnte nur in dieser Richtung sichergestellt werden, dass bei einer Auslenkung des Bohrhammers durch eine Querkraft dieser nicht gegen Bauteile des HAM stieß. Die Querkraft in y-Richtung wurde nach 30 mm Bohrtiefe auf 0 N geregelt.

Während der Versuche wurde der Bohrhammer nach dem Anfahren des Werkstücks über die Steuerung der Stromversorgung eingeschaltet. Um einen möglichen Einfluss der Bohrhammer- und Bohrer temperatur auf die Ergebnisse zu vermeiden, wurde vor einer Versuchsreihe eine Aufwärmphase des Bohrhammers und eine Abkühlphase des Bohrers zwischen jedem Versuchsdurchlauf durchgeführt. So kühlte der Bohrer zwischen jeder Bohrung auf 60 °C ab. Die

Aufwärmphase des Bohrhammers betrug acht Minuten. Dadurch konnte vor allen Versuchsreihen eine annähernd konstante Temperatur erreicht werden. Die Temperatur des Bohrhammers lag während des Bohrens zwischen 80 °C und 90 °C. In den Versuchen wurde überwacht, dass der Bohrerhammer in diesem Bereich lag, da eine niedrige Betriebstemperatur des Bohrhammers dessen Verhalten negativ beeinflussen kann (Cronjäger & Jahn, 1985).

Tabelle 6.4: Faktorstufen der unabhängigen Variablen für die kausale Studie I (Übersetzt aus Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2022)

FAKTOR	FAKTORSTUFE					
Vorschubkraft [N]	80	110	140	170	200	230
Querkraft [N]	0		20		40	60
Bohrhammer	Hilti TE 30			Bosch GBH 3-28		
Bohrer	Wendelbohrer D10 mit zwei Schneidkanten		Wendelbohrer D10 mit vier Schneidkanten		Hohlbohrer D14 mit zwei Schneidkanten	

### 6.2.3 Datenauswertung

Das unbearbeitete Rohsignal aller Messungen umfasste die folgenden Phasen eines Versuchs: Ansetzen des Bohrers an das Werkstück, Start des Bohrens, Bohrschritt 1, Entlüftung, Bohrschritt 2 (siehe Abbildung 6.4).

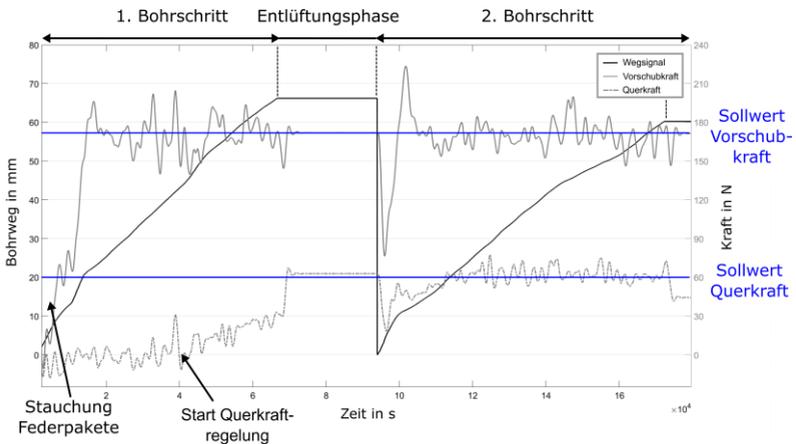


Abbildung 6.4: Rohsignal der Vorschubkraft (graue durchgezogene Linie) und der Querkraft (graue gestrichelte Linie) sowie das Wegsignal (schwarz gestrichelte Linie) einer Bohrung mit den Sollwerten der Vorschubkraft von 170 N (blau) und der Querkraft von 60 N (blau). Phasen: 1. Ansetzen und Start der Bohrung, 2. erster Bohrschritt, 3. Entlüftungsphase, 4. zweiter Bohrschritt & Auswertebereich (grau). (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2022)

In der Startphase des Bohrvorgangs wurde der Sollwert der Vorschubkraft (FF) aufgebaut. Die gemessene Bohrtiefe in dem ersten Bohrfortschritt wurde durch die vorschubkraftabhängige Stauchung der Federn des HAM verfälscht, da die Bohrtiefe über das Signal der ausgeführten Positionskorrektur des Roboters ermittelt wurde. Aufgrund dessen wurde der vorgegebene Absolutwert der Bohrtiefe entsprechend größer eingegeben und alle 50 Bohrungen manuell überprüft. Wie bereits in Kapitel 6.2.2 erwähnt, wurde die Querkraft erst ab einer Bohrtiefe von 30 mm aufgebracht. Die durch die Regelung verursachte Nachstellzeit führte dazu, dass zu Beginn des ersten Bohrschrittes die Sollwerte der Querkraft teilweise noch nicht erreicht wurden. Für die Analyse der Messdaten sind deshalb nur die Bereiche ausgewertet worden, in denen die Sollwerte von Vorschub- und Querkraft erreicht wurden. Aufgrund dessen wurde bei den folgenden Analysen lediglich der zweite Bohrschritt ausgewertet. Die Zeitpunkte für das Zuschneiden des Rohsignals auf den relevanten Auswertebereich wurden auf Basis des Kraftsignals ermittelt. Ein Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz filterte hochfrequente

Schwingungen im Kraftsignal heraus, die durch die Hammerschläge und durch die daraus resultierenden Vibrationen erzeugt wurden. Die Verarbeitung der Rohsignale und die Berechnung der Bewertungsgrößen wurden mit Matlab (Matlab R2017a, The MathWorks, Natick, MA, USA) durchgeführt. Weiterhin wurden die so berechneten abhängigen Variablen graphisch ausgewertet und mit SPSS (IBM SPSS Statistics 25, IBM, Armonk, NY, USA) statistisch analysiert. Im Kapitel *Ergebnisse* wurden Mittelwerte ( $M$ ), Median ( $Mdn$ ), Standardabweichung ( $SD$ ) und Interquartilsabstand ( $IQA$ ) angegeben. P-Werte  $< .05$  wurden als signifikant angesehen. In dieser Arbeit wird die Notation bezüglich der statistischen Schreibweise entsprechend den Vorgaben der Deutschen Gesellschaft für Psychologie gehalten. Daraus folgt insbesondere, dass eine Null vor dem Dezimaltrennzeichen angegeben wird, wenn der Zahlenwert größer als Null werden kann. Bei statistischen Größen, bei welchen dies nicht möglich ist, entfällt die Null. Die Stellen nach dem Dezimaltrennzeichen werden auf zwei Stellen gerundet, außer bei Wahrscheinlichkeitsangaben. Um ein einheitliches Erscheinungsbild in dieser Arbeit zu erhalten, wird als Dezimaltrennzeichen ein Punkt gewählt.

### 6.2.3.1 Produktivität

Zur Ermittlung der ROP wurde die im Auswertebereich ausgeführte Bohrtiefe durch die Zeitdauer  $t$  des Auswertebereichs geteilt, wie in Gleichung 6.1 angegeben ist. Zur Bestimmung der Bohrtiefe wurde die vom Roboter im Auswertebereich ausgeführte Bewegung  $s$  in Vorschubrichtung verwendet.

$$ROP = \frac{s_{Ende} - s_{Start}}{t_{Ende} - t_{Start}} \quad 6.1$$

Ziel dieser Analyse war es, den Zusammenhang zwischen der Vorschub- bzw. Querkraft und der ROP zu ermitteln. Weiterhin war es von Interesse zu untersuchen, ob sich dieser Zusammenhang auf die einzelnen Setups, bestehend aus Bohrhammer und Bohrer, übertragen lässt. Um eine möglichst hohe Signifikanz der statistischen Tests zu erreichen, wurden die Daten aller Setups mit einem ähnlichen Verlauf zusammengefasst. Hatten die Setups einen ähnlichen Verlauf, unterschieden sich aber durch eine deutliche Abweichung der Mittelwerte voneinander, wurde eine z-Transformation der Messdaten durchgeführt.

Bei der Verwendung einer multifaktoriellen ANOVA zur Bestimmung des Einflusses der Faktoren Bohrhammer und Bohrer bestand jede Gruppe aus acht Stichproben. Für diese Gruppen deutete der Levene-Test ( $F(143,1003) = 1.479, p = .001$ ) auf eine Ungleichheit der Varianzen hin. Daher wurden nicht-parametrische Tests durchgeführt, um einen möglichen Einfluss der beiden Faktoren zu

untersuchen. Der Haupteffekt des Bohrhammers (zwei Faktorstufen) auf die ROP wurde mit einem Mann-Whitney-U-Test ermittelt, während der Effekt des Bohrermodells (> 2 Faktorstufen) mit einem Kruskal-Wallis-Test ermittelt wurde. Die untersuchten Haupteffekte wurden anschließend anhand der Effektgröße nach Cohen (1992) ausgewertet.

Darüber hinaus wurde mit dem Kruskal-Wallis-Test der Effekt von Vorschub- und Querkraft untersucht und mit Post-hoc-Tests die mittleren Produktivitätsunterschiede durch die einzelnen Faktorstufen statistisch analysiert. Um dem Problem einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von  $\alpha$ -Fehlern zu begegnen, wurde die Bonferroni-Korrektur angewendet. Abschließend wurden die Effektstärken von Vorschub- und Querkraft auf die ROP berechnet. Bei der statistischen Auswertung der Messdaten wurden fünf Versuchsdurchläufe nicht berücksichtigt, da der Bohrprozess während ihrer Durchführung unterbrochen wurde.

### 6.2.3.2 Vibrationen

Nachdem die Rohsignale auf den Auswertebereich zugeschnitten wurden, konnten die abhängigen Variablen aus den Beschleunigungsdaten berechnet werden. Um die Belastung des Anwenders durch die Vibrationen zu bewerten, wurde der  $a_{hv}$ -Wert für beide Beschleunigungen nach DIN EN ISO 28927-10 (DIN EN ISO 28927-10) und DIN EN ISO 5349-1 (DIN EN ISO 5349) berechnet. Um beurteilen zu können, wodurch die unterschiedlichen  $a_{hv}$ -Werte im Gerät verursacht wurden, wurde ein Vergleich der Zeitsignale der Beschleunigung herangezogen. Zu diesem Zweck wurden die Schwingungsdaten zunächst gefiltert. Dies geschah mit einem Butterworth-Tiefpassfilter 4. Ordnung, der eine Grenzfrequenz von 500 Hz besaß. Um den Einfluss der Anwenderkräfte auf die Schwingungen besser zu verstehen, wurde die Schlagfrequenz des Bohrhammers analysiert. Hierfür wurde eine Fourier-Transformationen durchgeführt.

Im ersten Schritt der statistischen Auswertung wurde geprüft, ob die Randbedingungen für parametrische Tests erfüllt waren. Da dies nicht der Fall war (bspw. keine Normalverteilung und Varianzgleichheit der Untergruppen), wurde mit dem Kruskal-Wallis-Test mit anschließendem Bonferroni-Post-hoc-Test überprüft, ob die Vorschub- und die Querkraft einen Einfluss hatten und ob dieser in allen Bohrerhammer-Bohrer-Setups auftrat. Für die Analyse des Einflusses der Anwenderkräfte auf die Schlagfrequenz, wurde je Bohrerhammer der Shapiro-Wilk-Test (Nachweis Normalverteilung der Grundgesamtheit je Gruppe), der Levene-Test (Überprüfung der Varianzhomogenität) und anschließend der t-Test genutzt.

## 6.3 Ergebnisse

In diesem Unterkapitel werden zunächst die Zusammenhänge der untersuchten Einflussfaktoren auf die Produktivität und anschließend auf die Belastung des Anwenders durch Vibrationen untersucht. Um den Effekt der Querkraft sowie die Interaktionseffekte mit den weiteren untersuchten Faktoren besser einordnen zu können, werden die Effekte dieser Faktoren ebenfalls untersucht und im nachfolgenden Kapitel diskutiert.

### 6.3.1.1 Produktivität

#### Einfluss des Bohrhammers

Mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests konnte gezeigt werden, dass für die untersuchten Bohrungen der Einsatz von zwei unterschiedlichen Bohrhämmern einen Einfluss auf die ermittelte ROP hatte (asymptotischer Mann-Whitney-U-Test:  $z = 5.502$ ,  $p < .001$ ). Die Effektgröße nach Cohen (1992) betrug  $r = .16$  und deutet auf einen schwachen Effekt hin. So hatte das Bohren mit dem Bohrhämmer von Hilti (Hi) eine höhere ROP ( $Mdn = 8.5$  mm/s,  $IQA = 3.3$  mm/s) als mit dem Bohrhämmer von Bosch (Bo) ( $Mdn = 8.2$  mm/s,  $IQA = 3.5$  mm/s). Dieser hatte eine geringere Schlagenergie und Schlagfrequenz (Bo:  $Mdn = 66.3$  Hz,  $SD = 2.2$  Hz, Hi:  $Mdn = 69.3$  Hz,  $SD = 2.8$  Hz).

#### Einfluss des Bohrertyps

Ein Kruskal-Wallis-Test bestätigte, dass die ermittelte ROP durch die Bohrertypen beeinflusst wurde ( $\chi^2(2) = 663.575$ ,  $p < .001$ ,  $r = .76$ ). Anschließende Post-hoc-Tests (Dunn-Bonferroni-Tests) zeigten, dass alle drei untersuchten Bohrermodelle statistisch signifikante Unterschiede hervorgerufen hatten. Der Post-hoc-Test zeigte aber auch, dass der Unterschied zwischen dem wendelförmigen Bohrer mit zwei Schneidkanten (He2c D = 10 mm) und dem Hohlbohrer mit zwei Schneidkanten (Ho2c D = 14 mm) ( $z = 20.582$ ,  $p < .001$ , Effektgröße nach Cohen (1992):  $r = .75$ ) sowie dem Wendelbohrer mit vier Schneidkanten (He4c D = 10 mm) und dem Hohlbohrer ( $z = 23.733$ ,  $p < .001$ , Effektgröße nach Cohen (1992):  $r = .86$ ) signifikant größer war als der Unterschied zwischen den Wendelbohrermodellen mit zwei und vier Schneidkanten ( $z = -3.144$ ,  $p = .002$ , Effektgröße nach Cohen (1992):  $r = .11$ ). So wurde ein starker Effekt zwischen dem Hohlbohrer mit einem Durchmesser von  $D = 14$  mm und den wendelförmigen Bohrern, die mit  $D = 10$  mm einen kleineren Durchmesser hatten, beobachtet. Wohingegen zwischen den beiden wendelförmigen Bohrern ein schwacher Effekt zu beobachten war. Dementsprechend trat bei den Versuchsdurchläufen mit Wendelbohrern mit vier Schneidkanten eine höhere mittlere ROP auf ( $Mdn = 9.1$  mm/s,  $IQA = 1.4$  mm/s) als

bei den Versuchsdurchläufen mit Hohlbohrern, die einen größeren Bohrerdurchmesser hatten ( $Mdn = 5.5$  mm/s,  $IQA = 1.8$  mm/s). Whingegen eine leicht niedrigere ROP bei Versuchsdurchläufen mit Wendelbohrern mit zwei Schneidkanten ( $Mdn = 8.9$  mm/s,  $IQA = 1.2$  mm/s) als bei denen mit vier Schneidkanten beobachtet wurde.

### **Einfluss der Vorschubkraft**

In Abbildung 6.5 sind die Mittelwerte der ROP über die Vorschubkraft (FF) in den Bohrlöchern für jedes Setup, bestehend aus Bohrer und Bohrhammer, dargestellt. Jeder Punkt basiert auf ca. 32 Bohrlöchern. Zusätzlich zeigt Anhang B Tabelle B.1: die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests und der Post-Hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur für die Vorschubkraft. Die  $p$ -Werte des Post-hoc-Tests wurden mittels SPSS bereits Bonferroni-korrigiert und somit auf  $p < .05$  geprüft.

Die Kurven der ROP für die einzelnen Setups stimmten mit den Ergebnissen der Mann-Whitney-U- und Kruskal-Wallis-Tests überein. So lagen die ROP des Hohlbohrers ( $D = 14$  mm) unter denen der Wendelbohrer ( $D = 10$  mm) und hatten einen Mittelwertunterschied zu den Modellen mit Wendel (Hi+Ho2c:  $Mdn = 6.1$  mm/s,  $SD = 1.1$  mm/s; Bo+Ho2c:  $Mdn = 5.1$  mm/s,  $SD = 0.9$  mm/s). Da diese beiden Kurven jedoch ab einer Vorschubkraft von  $FF = 110$  N den gleichen Verlauf zeigten, können die Messwerte dieser Versuchsdurchläufe sowohl für den Kruskal-Wallis-Test als auch für die Post-Hoc-Tests mittels einer z-Transformation gemeinsam ausgewertet werden. Der Kruskal-Wallis-Test bestätigt für die Versuchsdurchläufe mit dem Hohlbohrer einen starken Einfluss der Vorschubkraft auf die ROP beim Hammerbohren ( $\chi^2(5) = 162.083$ ,  $p < .001$ ,  $r = .65$ ). Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse des Vergleichs des mittleren Rangs mit der Vorschubkraft als Hauptfaktor anhand von Post-hoc-Tests mit dem Hohlbohrer einen Anstieg der ROP ( $p < .05$ ). So stieg die ROP kontinuierlich von  $Mdn = 4.9$  mm/s ( $FF = 110$  N,  $SD = 0.5$  mm/s) auf  $Mdn = 5.7$  mm/s ( $FF = 230$  N,  $SD = 0.9$  mm/s) um 15.9 % für den Bohrhammer von Bosch und von  $Mdn = 5.8$  mm/s ( $FF = 110$  N,  $SD = 0.5$  mm/s) auf  $Mdn = 6.7$  mm/s ( $FF = 230$  N,  $SD = 0.7$  mm/s) um 16.3 % für den Bohrhammer von Hilti, der eine höhere Schlagenergie besaß.

Bei den Wendelbohrern mit vier Schneidkanten war, wie bei den Hohlbohrern, ein Versatz des Medians durch das unterschiedliche Bohrhammermodell (Hi+He4c:  $Mdn = 9.5$  mm/s,  $SD = 1.1$  mm/s; Bo+He4c:  $Mdn = 8.8$  mm/s,  $SD = 0.9$  mm/s), aber auch ein ähnlicher Verlauf der Kurven zu beobachten. Für Wendelbohrer mit vier Schneidkanten wurden daher im Post-hoc-Test die Messwerte der Versuchsdurchläufe mittels einer z-Transformation gemeinsam ausgewertet. Der Kruskal-Wallis-Test bestätigte ebenfalls einen starken Einfluss der Vorschubkraft

auf die ROP ( $\chi^2(5) = 179.262, p < .001, r = .68$ ). Der ROP für die Wendelbohrer mit vier Schneidkanten stieg im Mittel um 4.9 % von  $Mdn = 9 \text{ mm/s}$  (FF = 110 N,  $SD = 0.8 \text{ mm/s}$ ) auf  $Mdn = 9.4 \text{ mm/s}$  (FF = 200 N,  $SD = 0.9 \text{ mm/s}$ ).

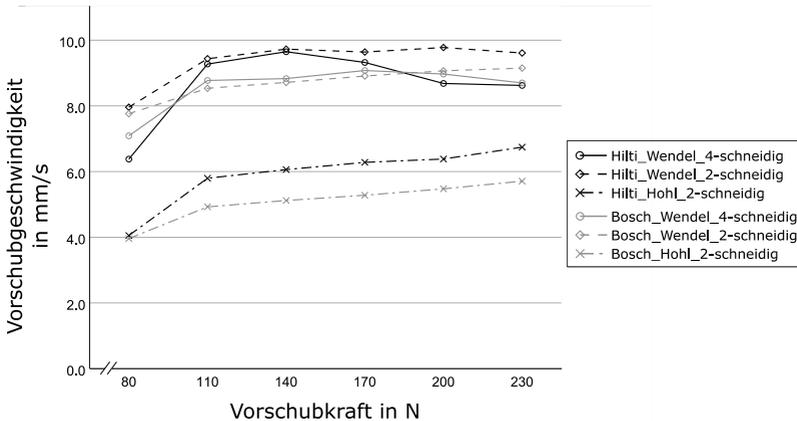


Abbildung 6.5: Mediane der Vorschubgeschwindigkeit (ROP) über Vorschubkraft für die verschiedenen Setups, bestehend aus verschiedenen Bohrern und Bohrhammern, inkl. Näherungslinie. Bei einer Gesamtzahl von  $n = 1147$  Bohrungen enthält jeder Punkt ca. 32 Versuchsdurchläufe. (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2022)

Die beiden Kurven der Wendelbohrer mit zwei Schneidkanten unterschieden sich durch einen Versatz, der durch das Bohrhammermodell verursacht wurde, was zu einem unterschiedlichen Verlauf führte. So ist in Abbildung 6.5 zu erkennen, dass bei zweischneidigen Wendelbohrern mit dem Bohrhammer von Hilti ein signifikanter Peak der ROP bei einer Vorschubkraft von FF = 140 N zu beobachten ist (FF1 = 80 N & FF2 = 140 N:  $z = -6.867, p < .001, FFI = 140 \text{ N} \ \& \ FFJ = 200 \text{ N}: z = 3.316, p < .05$ ). Mit dem Hammerbohrer von Bosch wurde dagegen bei den zweischneidigen Wendelbohrern ab einer Vorschubkraft von FF = 110 N ein relativ konstanter Verlauf der ROP beobachtet ( $Mdn = 8.9 \text{ mm/s}, SD = 0.8 \text{ mm/s}$ ). Dies zeigte sich auch in den Ergebnissen der Post-hoc-Tests, bei denen für Wendelbohrer mit zwei Schneidkanten mit Bohrhammern von Bosch im Bereich zwischen FF = 110 – 230 N keine signifikanten Mittelwertunterschiede festgestellt werden konnten.

In Abbildung 6.5 ist für alle untersuchten Setups bei einer Vorschubkraft von FF = 80 N eine Abnahme der ROP zu erkennen, die im Mittel 27.5 % beträgt. Anhand der Ergebnisse der Post-Hoc-Tests ist zu erkennen, dass sich die ROP für alle Setups

im Vergleich zu einer Vorschubkraft von  $FF = 80$  N unterscheidet ( $p < .01$ ). Abbildung 6.6 zeigt einen Boxplot der ROP je Faktorstufe der Querkraft für die Vorschubkräfte  $FF = 80 - 140$  N. Es ist zu erkennen, dass ein Anstieg der Querkraft bei einer Vorschubkraft von  $FF = 80$  N die ROP stärker reduziert als bei höheren Vorschubkräften.

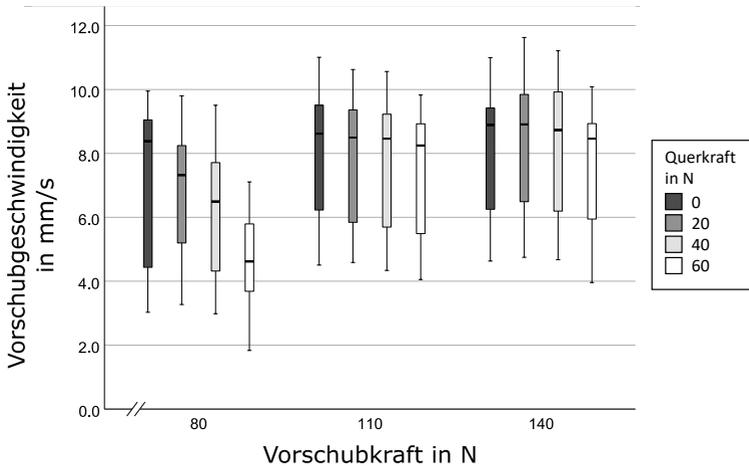


Abbildung 6.6: Boxplots der Vorschubgeschwindigkeit für Vorschubkräfte  $FF = 80 - 140$  N pro Querkraft zeigen einen größeren Einfluss der Querkraft bei 80 N Vorschubkraft. Die Whisker der Boxplots enthalten  $IQA * 1.5$  der Daten ( $n = 120$ ). Kleine Ausreißer sind als Punkte markiert, extreme Ausreißer ( $> IQA * 3$ ) sind als Asterisks symbolisiert. (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2022)

### Einfluss der Querkraft

Abbildung 6.7 zeigt für jedes Setup die Mediane der ROP über die während der Versuchsdurchläufe aufgebrauchte Querkraft (LF). Jeder Punkt enthält die Messwerte von ca. 48 Bohrungen. Die Kurven der einzelnen Setups zeigen alle einen ähnlichen Verlauf. Aufgrund des Versatzes zwischen den einzelnen Kurven wurden die Messdaten für die statistische Auswertung mittels eines Post-Hoc-Tests z-transformiert. Tabelle 6.5 zeigt die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests und der Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur für die Querkraft. Die  $p$ -Werte der Post-hoc-Tests wurden mittels SPSS bereits Bonferroni-korrigiert und somit auf  $p < .05$  geprüft.

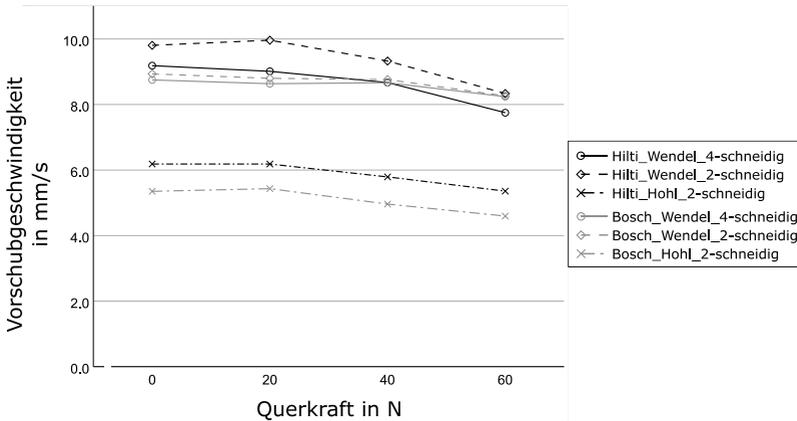


Abbildung 6.7: Mediane der ROP aufgetragen über der Querkraft für die verschiedenen Setups, bestehend aus den unterschiedlichen Bohrern und Bohrhämmern, inkl. Näherungslinie. Bei einer Gesamtzahl von  $n = 1147$  Bohrungen enthält jeder Datenpunkt ca. 48 Versuchsdurchläufe. (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2022)

Ein Kruskal-Wallis-Test bestätigt, dass es einen Einfluss der Querkraft auf die ROP mit mittlerer Effektstärke beim Hammerbohren gibt ( $\chi^2(3) = 113.887, p < .001, r = .32$ ). Wie in Abbildung 6.7 zu sehen ist und anhand der Post-Hoc-Tests (siehe Tabelle 6.5) nachgewiesen werden konnte, nahm bei Querkräften von  $LF = 20$  N und höher mit zunehmender Querkraft die ROP für alle untersuchten Setups signifikant ab ( $p < .01$ ). Diese Abnahme der ROP mit einer Erhöhung der Querkraft von  $LF = 0$  N auf  $LF = 60$  N betrug im Mittel etwa 13.7 %. Im Bereich zwischen  $LF = 0$  N und  $LF = 20$  N wurden in dieser Studie hingegen keine signifikanten Unterschiede der Mediane festgestellt. Werden die Kurven der ROP über der Querkraft betrachtet, so zeigt sich, dass für alle untersuchten Hohlbohrer sowie für die Wendelbohrer mit vier Schneidkanten unter Verwendung des Bohrhammers von Hilti die ROP konstant blieb oder leicht anstieg, wenn die Querkraft von  $LF = 0$  N auf  $LF = 20$  N erhöht wurde.

Tabelle 6.5: Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests und der Bonferroni-korrigierter Post-Hoc-Tests der Querkraft (LF) auf die z-transformierte Vorschubgeschwindigkeit über alle Versuchsdurchläufe. (Übersetzt aus Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2022)

<i>Kruskal-Wallis Test Statistik</i>				
		<i>df</i>	$\chi^2$	<i>p</i>
		3	113.887	<.001
<i>Mehrfachvergleich</i>				
<i>LF<sub>1</sub> [N]</i>	<i>LF<sub>2</sub> [N]</i>	<i>z</i>	<i>r</i>	
0	20	0.590	0.03	
	40	<b>3.849**</b>	0.16	
	60	<b>9.474***</b>	0.40	
20	40	<b>3.316**</b>	0.14	
	60	<b>8.952***</b>	0.37	
40	60	<b>5.643***</b>	0.24	

Basis: n=1147, Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test,  
\*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

### 6.3.1.2 Vibrationen

Vor der eigentlichen Auswertung wurde geprüft, ob die mit dem Prüfstand erzielten Ergebnisse mit den Angaben des Herstellers vergleichbar waren. Die Versuche zur Bestimmung des  $a_{HV}$ -Wertes nach der Norm (DIN EN ISO 28927-10) wurden für die beiden Bohrhammertypen bei ca. 110 N und einem Durchmesser von 16 mm durchgeführt. Aus diesem Grund wurde für den Vergleich nur der Hohlbohrer mit einem Durchmesser von 14 mm, FF = 110 N und LF = 0 sowie 20 N verwendet. Unter den beschriebenen Randbedingungen wurde für den Bohrhämmer GBH 3-28 von Bosch ein Median des  $a_{HV}$ -Wertes von  $Mdn = 14.3 \text{ m/s}^2$  und  $IQA = 1.2 \text{ m/s}^2$  und für den Bohrhämmer TE 30 von Hilti ein Median von  $Mdn = 9.4 \text{ m/s}^2$  und  $IQA = 1.8 \text{ m/s}^2$  ermittelt. Somit wurde auf dem Prüfstand eine Abweichung von  $0.2 \text{ m/s}^2$  (GBH 3-28) und  $0.6 \text{ m/s}^2$  (TE 30) gegenüber den Herstellerangaben festgestellt.

### Einfluss der Vorschubkraft

Die Schlagfrequenz von Bohrhammern ist aufgrund des Antriebsstrangs direkt an die Motordrehzahl gekoppelt. Die Varianzen der Schlagfrequenz der beiden Bohrhammer bei FF = 80 N und 230 N unterscheiden sich nicht signifikant, so dass von homogenen Varianzen ausgegangen werden kann, wie der Levene-Test zeigt ( $F(1,381) = 0.138$ ,  $p = < .711$ ,  $n = 383$ ). Mit dem t-Test wurde gezeigt, dass sich die Schlagfrequenz durch eine Erhöhung der Vorschubkraft veränderte ( $t(381) =$

12.952,  $p < .001$ ). Die Effektgröße nach Cohen (1992) beträgt  $r = .55$ , was einem starken Effekt entspricht. Wie in Abbildung 6.8 zu sehen ist, nahm die Schlagfrequenz sowohl von der TE 30 als auch der GBH 3-28 linear um etwa 4 Hz ab, wenn die Vorschubkraft erhöht wurde. Der TE 30 hat eine Schlagfrequenz von  $Mdn = 71.7$  Hz bei 80 N Vorschubkraft und sinkt auf einen Wert von  $Mdn = 67.7$  Hz bei  $FF = 230$  N. Der GBH 3-28 hat eine allgemein niedrigere Schlagfrequenz und sinkt von  $Mdn = 68$  Hz ( $FF = 80$  N) auf  $Mdn = 64.3$  Hz ( $FF = 230$  N). Werden die einzelnen Bohrertypen verglichen, kann beobachtet werden, dass über alle Bohrhammer hinweg die mittlere Schlagfrequenz bei den Hohlbohrern um 2.5 Hz sank, bei den zweischneidigen Wendelbohrern um 4.8 Hz und bei den vierschneidigen Wendelbohrern um 4.7 Hz.

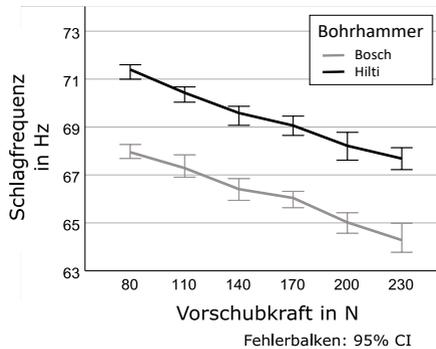


Abbildung 6.8: Einfluss der Vorschubkraft auf die Schlagfrequenz für jeden Bohrhammer. Die Daten umfassen alle analysierten Bohrertypen (n = 1152). (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2022)

Abbildung 6.9 zeigt den Einfluss der Vorschubkraft auf den  $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse und am Hauptgriff. Hierbei wurde zwischen den beiden Bohrhammern und den einzelnen Bohrertypen unterschieden. Es ist zu erkennen, dass beim GBH 3-28 der  $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse mit zunehmender Vorschubkraft linear abnimmt. Es wurde in dieser Studie nachgewiesen, dass es einen großen Effekt für den Hohlbohrer von  $FF = 80$  bis 230 N und einen mittleren Effekt für die Wendelbohrer gab. Am Hauptgriff konnte ein Einfluss der Vorschubkraft auf den  $a_{hv}$ -Wert jedoch nur für den Wendelbohrer mit zwei Schneidkanten nachgewiesen werden. Hier zeigte sich ein mittlerer Effekt. Wie in Abbildung 6.9 unten links zu sehen ist, hat die Kurve des Wendelbohrers mit zwei Schneidkanten einen quadratischen Verlauf mit einem Maximum von  $16 \text{ m/s}^2$  bei einer Vorschubkraft von 170 N. Der Bohrer mit vier

Schneidkanten zeigte ebenfalls einen nach unten geöffneten quadratischen Verlauf, während der Verlauf beim Hohlbohrer abzunehmen schien. Diese Effekte konnten jedoch statistisch nicht nachgewiesen werden.

Für den TE 30 ergaben die Bohrerarten am Gehäuse einen unterschiedlichen Verlauf des  $a_{hv}$ -Wertes. Für den Bohrer mit vier Schneidkanten konnte kein Einfluss der Vorschubkraft festgestellt werden. Hierbei wurde ein Median von  $13 \text{ m/s}^2$  für alle Vorschubkräfte beobachtet. Für den Wendelbohrer mit zwei Schneidkanten konnte nur ein geringer Einfluss zwischen  $FF = 110 \text{ N}$  und  $170$  bzw.  $200 \text{ N}$  festgestellt werden. Die Kurve der  $a_{hv}$ -Werte besitzt einen wellenförmigen Verlauf. Für den Hohlbohrer wurde ein Unterschied zwischen  $FF = 80 \text{ N}$  ( $Mdn = 13.7 \text{ m/s}^2$ ) und den anderen Vorschubkräften ( $Mdn = 16.3 \text{ m/s}^2$ ) nachgewiesen. Hier trat ein mittlerer Effekt auf. Wie beim Gehäuse konnte auch für den Hauptgriff kein Unterschied durch Variation der Vorschubkraft für den Bohrer mit vier Schneidkanten nachgewiesen werden. Der Median über allen Vorschubkräften lag bei  $10 \text{ m/s}^2$ . Für den Wendelbohrer mit zwei Schneidkanten ist ein v-förmiger Trend zu erkennen. Es konnte jedoch nur ein kleiner Effekt zwischen  $80 \text{ N}$  und  $170 \text{ N}$  festgestellt werden. Beim Hohlbohrer ist der relative Verlauf der Kurve mit dem des Gehäuses vergleichbar. Außer bei  $FF = 80$  bis  $230 \text{ N}$  konnte auch ein Unterschied zwischen  $FF = 80 \text{ N}$  und den anderen Vorschubkräften nachgewiesen werden. Nach Cohen (1992) entsprach dies aufgrund der hohen Streuung einem kleinen Effekt. Im Gegensatz zu den anderen Setups trat für den Hohlbohrer eine sehr hohe Streuung auf, die bei  $FF = 200 \text{ N}$  und insbesondere bei  $230 \text{ N}$  mit den anderen Bohrerarten wieder vergleichbar wurde.

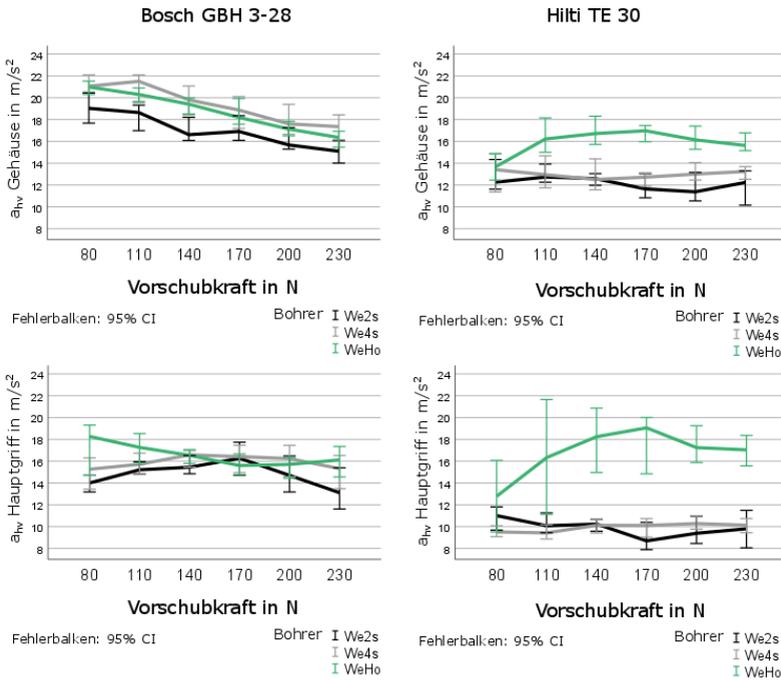


Abbildung 6.9: Einfluss der Vorschubkraft auf den  $a_{hv}$ -Wert des Gehäuses und des Hauptgriffs für jeden Bohrhammer und auf jeden Bohrer ( $n = 1152$ ). (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2022)

Anhang B Abbildung B.6 bis B.8 zeigen die tiefpassgefilterten Zeitsignale der Schwingung in z-Richtung des Gehäuses (schwarze Linie) und des Hauptgriffs (grüne Linie). Die ersten sechs Diagramme beinhalten die Signale des GBH 3-28 in Kombination mit einem Wendelbohrer mit vier Schneidkanten bei verschiedenen Vorschubkräften (Anhang B Abbildung B.6) und in Anhang B Abbildung B.7 die Signale des TE 30. Da anhand der Diagramme in Abbildung 6.9 nachgewiesen werden kann, dass sich die  $a_{hv}$ -Werte für die TE 30 mit Hohlbohrer drastisch unterscheiden, sind in Anhang B Abbildung B.8 auch die dazu zugehörigen Zeitsignale dargestellt. Zum besseren Verständnis sind die aus dem Stand der Forschung bekannten Ereignisse in den einzelnen Diagrammen durch die entsprechenden Abkürzungen gekennzeichnet. Die bekannten Stöße treten wie

folgt auf: beim Auftreffen des Gehäuses bzw. des Dämpfungselementes auf den Zwischenkolben durch die vom Anwender aufgebrachte Andruckkraft (B), beim Zusammendrücken der Luftfeder durch die Vorwärtsbewegung des Antriebskolbens (SA) und durch das Zurückfedern des Zwischenkolbens nach dem Stoß (ZK). Der ZK-Aufprall kann entweder durch den Aufprall des Zwischenkolbens auf das Dämpfungselement oder durch den Aufprall dessen auf den Schlagkolben verursacht werden. Beim Vergleich der Zeitsignale der beiden Bohrhämmer fällt auf, dass die drei bekannten Schläge im Signal des GBH 3-28 von anderen Schwingungen stark überlagert werden. Weiterhin wurde beobachtet, dass im Gegensatz zum GBH 3-28 der B-Schlag beim TE 30 bei einer Vorschubkraft von 80 N kaum auftrat. Bei  $FF = 110$  N trat der B-Schlag alternierend auf und wurde mit zunehmender Vorschubkraft stärker. Der zunehmende B-Schlag und sein früheres Auftreten im Schlagzyklus war auch bei der GBH 3-28 zu beobachten. Auch hier war eine deutliche Abnahme des ZK-Schlags zu erkennen. Bei den Zeitsignalen am Hauptgriff fiel auf, dass der SA-Schlag bei beiden Bohrhämmern kaum noch sichtbar war. Auch der B-Schlag nahm am Hauptgriff bei beiden, besonders aber beim Bohrhämmer TE 30, zu. In den Diagrammen des Hohlbohrers ist zu erkennen, dass bei  $FF = 80$  N der B-Schlag kaum auftrat. Wurde die  $FF$  auf 170 N erhöht, wurden sowohl B, SA und ZK deutlich stärker. Dies ist deutlich stärker ausgeprägt als beim Wendelbohrer mit vier Schneidkanten. Bei  $FF = 230$  N nahmen die drei Schläge wieder ab, waren aber immer noch deutlich stärker als bei  $FF = 80$  N, mit Ausnahme von SA.

### **Einfluss der Querkraft**

Die Varianzen der Schlagfrequenz der beiden Bohrhämmer bei  $LF = 0$  N und 60 N unterscheiden sich signifikant. Es kann also nicht von homogenen Varianzen ausgegangen werden, wie eine Analyse mittels Levene-Test zeigte ( $F(1,573) = 6.968$ ,  $p = .009$ ,  $n = 575$ ). Mit dem Welch-Test wurde nachgewiesen, dass sich die Schlagfrequenz signifikant veränderte ( $t(549.800) = 5.431$ ,  $p = < .001$ ). Die Effektstärke nach Cohen (1992) beträgt  $r = .23$ , was einem schwachen Effekt entspricht. Wenn die Querkraft in den Versuchsdurchläufen erhöht wurde, verringerte sich die Schlagfrequenz (siehe Abbildung 6.10). Ohne aufgebrachte Querkraft hatte der TE 30 eine Schlagfrequenz von  $Mdn = 70$  Hz und verringerte sich um 1.7 Hz ( $LF = 60$  N), wenn die Querkraft erhöht wurde. Der GBH 3-28 hingegen hatte bei  $LF = 0$  N eine Schlagfrequenz von 66.8 Hz und nahm um 1.5 Hz ab.

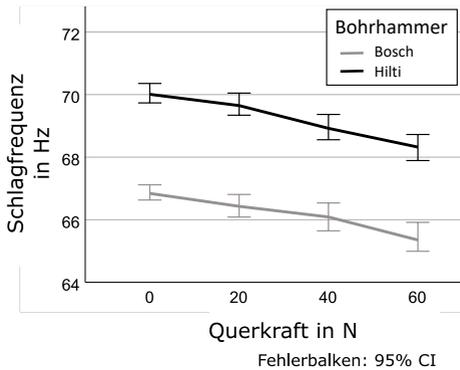


Abbildung 6.10: Einfluss der Querkraft auf die Schlagfrequenz für jeden Bohrhämmer. Die Daten umfassen alle analysierten Bohrertypen ( $n = 1152$ ). (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2022)

Der Einfluss der Querkraft auf den  $a_{hv}$ -Wert ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Auch hier wurde zwischen den Bohrhämmern und den drei Bohrertypen unterschieden. Beim Vergleich der  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse des GBH 3-28 verhielten sich die drei Bohrertypen beim Auftreten von Querkräften sehr ähnlich (Abbildung 6.11, oben links). Zunächst scheinen die  $a_{hv}$ -Werte bei allen Bohrertypen anzusteigen, obwohl dies statistisch nicht nachgewiesen werden konnte (Anhang B Tabelle B.5: ). Anschließend fallen die Kurven ab. Beim Hohlbohrer konnte kein Einfluss der Querkraft auf die Gehäuseschwingung nachgewiesen werden. Für den Wendelbohrer mit zwei Schneidkanten zeigte sich jedoch ein mittlerer Effekt mit  $r = .46$ . Darüber hinaus zeigte der Bohrer mit vier Schneidkanten mit  $r = .60$  sogar einen starken Effekt. Im Gegensatz zum Gehäuse stiegen die  $a_{hv}$ -Werte am Hauptgriff bei allen Bohrern an (Abbildung 6.11, unten links). Der  $a_{hv}$ -Wert am Hohlbohrer stieg über alle aufgebrauchten Querkräfte an, wobei zwischen  $LF = 40$  und  $60$  N kein Anstieg feststellbar war und ein starker Effekt mit  $r = .70$  auftrat. Bei beiden Wendelbohrern trat ein linearer Anstieg zwischen  $LF = 0$  und  $40$  N auf. Zwischen einer Querkraft von  $40$  und  $60$  N scheint der  $a_{hv}$ -Wert wieder leicht zu sinken. Dies konnte jedoch statistisch nicht nachgewiesen werden.

Der  $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse des TE 30 (Abbildung 6.11, oben rechts) wurde durch die Querkraft im zweischneidigen Wendelbohrer nicht beeinflusst ( $Mdn = 12.3$  m/s<sup>2</sup>).

Der Verlauf des Hohlbohrers ist ähnlich dem des Bohrhammers von Bosch, jedoch konnte nur ein Unterschied zwischen einer Querkraft von 0 N und 20 N und ein geringer Effekt ( $r = .26$ ) gezeigt werden (Anhang B Tabelle B.4: ). Bei dem Wendelbohrer mit vier Schneidkanten nahm der  $a_{hv}$ -Wert mit der Erhöhung der Querkraft ab. Die stärkste Abnahme wurde zwischen LF = 20 und 40 N festgestellt. Die Effektstärke von  $r = .56$ , also ein starker Effekt, ergab sich bei einem Anstieg der Querkraft von LF = 0 auf 60 N. Am Hauptgriff nahmen die Schwingungswerte wie beim GBH 3-28 zu. Der Anstieg der Kurven der beiden Wendelbohrer scheint vergleichbar zu sein (siehe Abbildung 6.11, unten links). Für den Wendelbohrer mit zwei Schneidkanten war der Sprung zwischen LF = 20 und 40 N am größten, aber nur zwischen LF = 0 und 60 N konnte ein kleiner Effekt von  $r = .21$  nachgewiesen werden. Für den Bohrer mit vier Schneidkanten wurde ein mittlerer Effekt ( $r = .41$  von LF = 0 bis 60 N) beobachtet. Der größte Anstieg zwischen LF = 20 und 40 N entsprach einer kleinen Effektstärke von  $r = .27$ . Im Gegensatz zu den Wendelbohrern änderte sich der  $a_{hv}$ -Wert des Hohlbohrers stärker ( $r = .71$ ).

Im Anhang B Abbildung B.1 bis B.5 zeigen die beispielhaften Zeitsignale der Gehäuse- (schwarze Linie) und Hauptgriffschwingung (grüne Linie) in z-Richtung. In den Diagrammen wurden für zwei Schlagzyklen die bekannten Schläge B, SA und ZK markiert. Hier sind die Zeitverläufe der beiden Bohrhammer dargestellt. Die Abbildungen B.1 und B.2 sind dem GBH 3-28 und die Abbildungen B.3 und B.5 dem TE 30 zugehörig. Es werden beispielhaft die Änderungen durch die Querkraft bei FF = 110 N und bei FF = 170 N aufgezeigt. Da die Diagramme in Abbildung 6.11 zeigen, dass sich die  $a_{hv}$ -Werte für den TE 30 mit Hohlbohrer drastisch unterscheiden, sind in der Abbildungen B.5 auch die Zeitsignale des Hohlbohrers dargestellt. Bei FF = 110 N ist im Beschleunigungssignal am Gehäuse des TE 30 zu erkennen, dass der B-Schlag bei zunehmenden Querkraften anstieg. Diese Effekte waren am Hauptgriff sowohl bei FF = 110 N als auch bei 170 N zu beobachten, wobei der ZK-Stoß ebenfalls stark zunahm. Bei FF = 170 N waren sowohl bei LF = 40 als auch bei 60 N der SA-Schlag noch gut zu erkennen. Die Zunahme des B-Schlags am Hauptgriff fand auch beim GBH 3-28 statt. Bei dem Bohrhammer von Bosch hatte sich zwischen den Schlägen B und SA ein zusätzlicher Schlag aufgebaut, der am Hauptgriff reduziert zu sehen war. Dieser Effekt ist im Stand der Forschung noch nicht beschrieben. In den Diagrammen, die das Zeitsignal des TE 30 mit Hohlbohrern zeigen, ist zu erkennen, dass sich am Gehäuse (schwarze Linie) der SA-Schlag erhöht hatte. Zusätzlich sind im Bereich des ZKs mehr Schwingungen zu sehen. Die Kurven des Hauptgriffs zeigen sehr deutlich, dass B und ZK stark anstiegen.

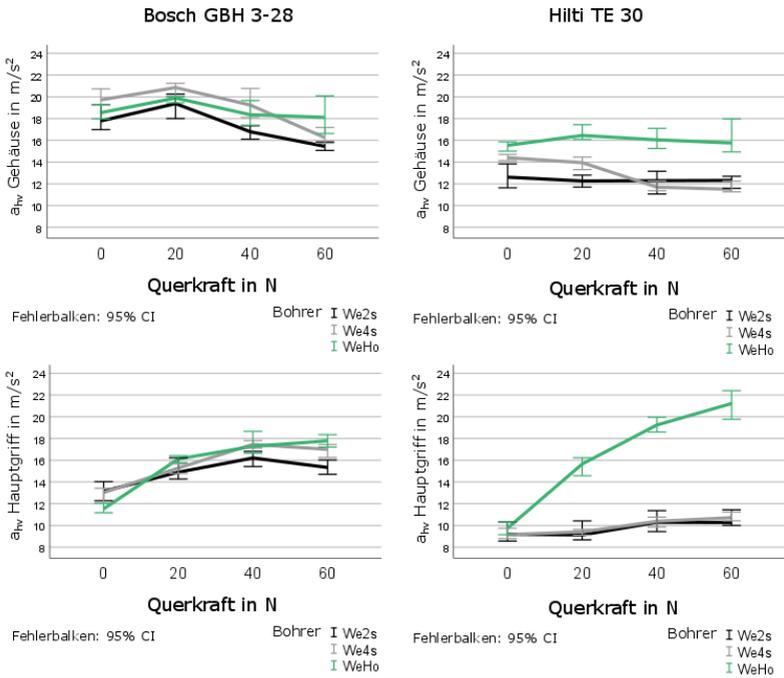


Abbildung 6.11: Einfluss der Querkraft auf den  $a_{hv}$ -Wert des Gehäuses und des Hauptgriffs für jeden Bohrhämmer und jeden Bohrertypen ( $n = 1152$ ). (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2022)

## 6.4 Diskussion

### 6.4.1 Produktivität

#### **Einfluss des Bohrhammers und des Bohrertyps**

Ein Ziel der durchgeführten Studie war es, den Einfluss der Interaktionen des Bohrhammers oder des Bohrertyps mit der Querkraft auf die ROP zu untersuchen. Da die Haupteffekte des Bohrhammers und der Bohrer einen relevanten Einfluss haben, werden diese zunächst beschrieben, um die weiteren Ergebnisse dieser Studie besser einordnen zu können. Darüber hinaus erlaubt die Verwendung von zwei Bohrhämmern mit unterschiedlicher Bauart einen Annahme bezüglich der Übertragbarkeit der Ergebnisse zu.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigten einen signifikanten, aber relativ schwachen Einfluss der verwendeten Bohrhämmermodelle auf die ROP. Es ist zu beachten, dass der Bohrhammer von Hilti einer höheren Bohrhämmerklasse angehört. Neben einem höheren Gewicht weist dieser eine höhere Schlagenergie und Schlagfrequenz als der Bohrhammer von Bosch auf. Daraus resultiert der mittlere Unterschied der ROP zwischen den beiden in dieser Studie verwendeten Bohrhämmermodellen (Cronjäger & Jahn, 1985; Gruner & Knoll, 2000; Hecker & Riederer, 1985).

Weiterhin zeigte die Analyse der Messdaten, dass das Bohrermodell je nach Modellvergleich einen schwachen bzw. einen starken Einfluss auf die Produktivität der Versuchsdurchläufe hatte. Nach Hecker & Riederer (1985) hat das Design eines Bohrers in Bezug auf den Bohrkopf und die Wendelform einen Einfluss auf den Bohrfortschritt. Die mit der höheren Schneidkantenanzahl einhergehende größere Anzahl von Wendelgängen ermöglicht einen effizienteren Abtransport des Bohrmehls. In Kombination mit der modellspezifischen Schneidkantengeometrie kann sich ein schwacher Produktivitätsunterschied zwischen Wendelbohrern mit zwei und vier Schneidkanten ergeben. Diese Beobachtungen decken sich zudem mit denen von manuellen Bohrversuchen aus der Hauptstudie der explorativen Studie. Der relativ starke mittlere ROP-Unterschied zwischen dem Hohlbohrer ( $D = 14$  mm) und den beiden wendelförmigen Bohrertypen ( $D = 10$  mm) lässt sich jedoch neben den konstruktiven Unterschieden vor allem durch den Unterschied im Durchmesser erklären. Je größer der Bohrerdurchmesser ist, desto größer ist die Fläche der Schneidkante der Bohrerspitze, über die sich die zum Herausschlagen des Materials aufgebrauchte Schlagenergie in den Bohrlochgrund verteilt. Damit sinkt nicht nur der resultierende Druck zwischen Bohrerspitze und Bohrlochgrund,

sondern auch der pro Hub erzielte Bohrfortschritt. Inwieweit der durchmesserunabhängige Effekt des Hohlbohrers gegenüber dem Wendelbohrer auf die ROP ausfällt, wurde anhand der Ergebnisse dieser Studie jedoch nicht untersucht.

### **Einfluss der Vorschubkraft**

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die vom Anwender aufgebrachte Vorschubkraft einen signifikanten Einfluss auf die Produktivität beim Hammerbohren, bewertet durch die ROP, hat. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem aktuellen Stand der Forschung (Botti et al., 2020; Hecker, 1983) sowie den manuellen Versuchen aus der explorativen Studie. Grundsätzlich ist die Produktivität beim Hammerbohren maßgeblich von der Schlagfrequenz und Schlagenergie abhängig (Gruner & Knoll, 2000; Hecker & Riederer, 1985). Basierend auf den Erkenntnissen des Forschungsstandes, der den Einfluss der Vorschubkraft auf die Schlagfrequenz und -energie berücksichtigt, kann deren Zusammenhang mit der ROP erklärt werden.

Hecker & Riederer (1985) sowie Schäfer (2018) untersuchten die Bewegungs- und Beschleunigungsprofile der Schlagkomponenten und konnten beim Hammerbohren einen grundsätzlichen alternierenden Schlagabfolge beobachten, bei dem das Dämpfungselement bzw. Dämpfungsring des Bohrhammergehäuses (siehe 125) bei jedem zweiten Schlag nicht auf den Zwischenkolben trifft. Dies deutet darauf hin, dass die Schlagkomponenten beim zweiten Schlag keinen Kontakt bzw. mehr Abstand zueinander haben. Somit verringert sich bei diesem schwächeren Schlag nicht nur die vom Schlagwerk auf die Bohrer übertragene Schlagenergie, sondern auch der Bohrfortschritt aufgrund größerer Übertragungsverluste (Gruner & Knoll, 2000). Je nach Höhe der vom Anwender aufgebrachten Vorschubkraft kann der Bohrhammer nach einem Schlag mehr oder weniger zurückschwingen. Dies beeinflusst den Rücklauf des Schlagkolbens und führt letztlich dazu, dass bei einer größeren Vorschubkraft die Kontaktelemente des Schlagwerks beim zweiten schwächeren Hub näher beieinanderliegen. Dadurch steigt die auf den Bohrer übertragene Schlagenergie und damit die Produktivität (Gruner & Knoll, 2000).

Vonnemann (1977) untersuchte den Impulsverlauf des Schlagvorgangs beim Hammerbohren und konnte auf Basis seiner Erkenntnisse eine weitere Hypothese über den Einfluss der Vorschubkraft auf die Produktivität beim Hammerbohren ableiten. Ausgehend von der Eindringhysterese der Schneide in das Werkstück identifizierte er für sein Setup vier Phasen des Materialabtrags während einer Schlagperiode des Bohrhammers. Diese werden durch Impulsreflexionen innerhalb der Bohrer verursacht. Vonnemann beschrieb, dass die Schneide während jeder

Eindringphase zunächst das Bohrmehl und Bohrklein durchdringen muss, bevor sie den Bohrlochgrund erreicht. Hierbei wird mehr Schlagenergie in Reibung umgewandelt und an der Spitze reflektiert. Dadurch wird diese Energie nicht zielführend in den Untergrund eingeleitet, wodurch der Beton schlechter zertrümmert wird. Mit zunehmender Vorschubkraft wird das Bohrmehl und Bohrklein durch den Anwender stärker verdrängt. Der Energieanteil des Impulses, der zum Durchdringen des Bohrkleins aufgebracht werden muss, wird dadurch reduziert. So kann ein größerer Anteil der Schlagenergie für die eigentliche Zertrümmerung des Betons genutzt werden und der Bohrfortschritt kann mit größerer Vorschubkraft ansteigen.

Zusätzlich werden im Folgenden die Einflüsse der Vorschubkraft auf die Reibung im Bohrloch diskutiert. Die Motordrehzahl des Bohrhammers und die mechanisch gekoppelte Schlagfrequenz hängen vom Reibungswiderstand im Bohrloch ab. Mit zunehmender Vorschubkraft erhöht sich auch der Reibungswiderstand zwischen Bohrspitze und Bohrlochgrund. Außerdem steigt mit zunehmendem Bohrfortschritt auch die Menge des vom Bohrer abzutragenden Bohrmehls. Bei einem Wendelbohrer wird das Bohrmehl über die Wendelgänge vom Bohrlochgrund zur Oberfläche des Werkstücks transportiert. Hecker (1983) beschrieb die im Bohrloch auftretenden Reibungskräfte zwischen dem Bohrer und dem Bohrmehl. So kann mit steigender ROP das erhöhte Volumen des abzutragenden Bohrmehls über die Verdichtung des Bohrmehls hinaus zu erhöhten Reibungskräften und im Extremfall sogar zum Verstopfen der Wendelgänge führen. Ein Verstopfen der Wendelgänge würde zu einem Verkeilen des Bohrers und damit zum Auslösen der Rutschkupplung des Bohrhammers führen. Dies ist jedoch bei den Versuchsdurchläufen nicht aufgetreten. Die durchgeführte Frequenzanalyse der Gehäusebeschleunigungen zeigte, dass mit steigender Vorschubkraft die Schlagfrequenz und damit auch die mechanisch gekoppelte Motordrehzahl bei allen verwendeten Setups abnahm. Die Ergebnisse der Schlagfrequenz des Hohlbohrers lassen den Schluss zu, dass diese aufgrund des Absaugmechanismus des Bohrmehls weniger stark abnahm als bei den Wendelbohrern (Hecker & Riederer, 1985).

Bezüglich dieser Effekte bei den zweischneidigen Hohlbohrern lässt sich der lineare Anstieg der ROP ab einer Vorschubkraft von 110 N dadurch erklären, dass sich die Energieübertragung der Schlagkomponenten und der Kontakt des Bohrers mit dem Beton mit der Vorschubkraft verbessert, während die Schlagfrequenz abnimmt. Im Gegensatz zu den Wendelbohrern ist der Transport des Bohrmehls bei Hohlbohrern entkoppelt von der Drehzahl. Dies hat zur Folge, dass durch die geringere Schlagzahl zwar weniger Schläge pro Sekunde erfolgen, das erhöhte Bohrmehlvolumen jedoch trotzdem gleichbleibend abtransportiert wird.

Eine Überlagerung der beschriebenen Effekte führte hingegen dazu, dass bei den Wendelbohrern die ROP aufgrund des zusätzlichen Reibungswiderstandes durch den Abtransport des Bohrmehls sank. So wurde bei den zweischneidigen Wendelbohrern mit dem Bohrhammer von Hilti ein signifikanter Peak des ROP-Verlaufes bei  $FF = 140 \text{ N}$  beobachtet. Diese Beobachtung stimmt mit der Studie von Botti et al. (2020) überein, in der ebenfalls ein Peak der ROP für einen Wendelbohrer mit zwei Schneidkanten beobachtet wurde. Der Vergleich mit dem Stand der Forschung bestätigt auch, dass der detaillierte Verlauf der untersuchten Zusammenhänge systemspezifisch ist. So sind die Unterschiede im beobachteten Hochpunkt von Botti et al. im Vergleich zu den in dieser Studie untersuchten Setups auf die unterschiedlichen Bohrhammer- und Bohrermodelle zurückzuführen.

Im Gegensatz dazu trat bei Wendelbohrern mit vier Schneidkanten ab einer Vorschubkraft von  $110 \text{ N}$  ein linearer Anstieg der ROP auf, der aufgrund des zusätzlichen Reibungswiderstandes durch den Abtransport des Bohrmehls geringer war als bei Hohlbohrern mit zwei Schneidkanten. Ein Peak der ROP konnte jedoch bei Wendelbohrern mit vier Schneidkanten nicht beobachtet werden, da der Reibungswiderstand von der jeweiligen Wendelform bzw. dem Wendelvolumen eines Bohrers abhängt und dieser Peak daher vermutlich jenseits der untersuchten Faktorstufen der Vorschubkraft auftritt. Der Verlauf der ROP über die Vorschubkraft von zweischneidigen Wendelbohrern mit dem Bohrhammer von Bosch deutete auf einen tendenziellen Peak der ROP hin. Dieser konnte jedoch anhand der Ergebnisse nicht signifikant nachgewiesen werden. Ob auch bei Hohlbohrern ein ROP-Hochpunkt in Abhängigkeit von der Vorschubkraft auftritt, konnte anhand der Ergebnisse dieser Studie nicht beurteilt werden. In Untersuchungen von Kivade et al. (2015) konnten beim Presslufthammerbohren für alle untersuchten Integralbohrern einen Peak der ROP beobachtet werden. Kivade et al. beschrieben einen auftretenden Strömungsabriss, wenn zu viel Bohrmehl entfernt werden muss. Hierdurch führte ein Vorspannen des Hohlbohrers zu einem Einbruch der ROP. Inwieweit sich die Erkenntnisse von Kivade et al. auf den Hohlbohrer und elektropneumatische Bohrhämmer übertragen lassen, muss noch untersucht werden.

Weiterhin zeigte die Beobachtung einen starken Abfall der ROP bei einer Vorschubkraft von  $80 \text{ N}$  für alle untersuchten Setups. Bei einer so geringen Vorschubkraft hebt der Bohrhammer aufgrund der Trägheitskräfte der Beschleunigungen Schlagwerksmassen deutlicher vom Untergrund ab. Dies hat zur Folge, dass beim nachfolgenden Schlag ein größerer Abstand zwischen den Komponenten des Schlagwerks besteht. Dadurch kann der Antriebskolben beim nachfolgenden Schlag die Schlagenergie nicht optimal über den Schlagkolben auf den Bohrer übertragen. Die Folge ist ein instabiler Bohrvorgang, der zu

alternierenden Schläge und schließlich zu einem deutlichen Abfall der ROP führt. Ab einer zu geringen Vorschubkraft ist somit die Zuverlässigkeit des Bohrprozesses nicht mehr gegeben (Vonnemann, 1977).

### **Einfluss der Querkraft**

In dieser Studie konnte für alle untersuchten Setups ein Einfluss bei einer Querkraft von 40 N und 60 N nachgewiesen werden. So verringerte sich mit zunehmender Querkraft bei diesen Faktorstufen die ROP deutlich.

Beim Aufbringen einer Querkraft führte der Roboter eine Bewegung senkrecht zur Bohrachse aus. In den Versuchen wurde die Querkraft erst nach einer Bohrtiefe von 30 mm aufgebracht. Durch die dadurch entstehende Einspannung des Bohrers im Bohrloch und der Nachgiebigkeit der Elastomere des HAM verursachte die aufgebrachte Querkraft eine Biegung und leichte Schrägstellung der Bohrer bzw. Bohrhammers. Dies wiederum führte dazu, dass der Bohrschaft und die Bohrlochwand in Kontakt kamen, was eine zusätzliche Reibung zur Folge hatte. Diese zusätzliche Reibung reduzierte die resultierende Schlagenergie, die von der Bohrerspitze auf den Bohrlochgrund übertragen werden konnte. Darüber hinaus reduzierte der Reibungswiderstand die Motordrehzahl des Bohrhammers und damit die mechanisch gekoppelte Schlagfrequenz. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Produktivität mit zunehmender Querkraft, die hier anhand der ROP bewertet wurde, abnahm.

Ebenso nahm die Querkraft Einfluss auf die Komponenten des Schlagwerks. Die durch die Querkraft verursachte zusätzliche Reibung im Bohrloch wirkte sich negativ auf den Rückstoß des Bohrers aus. In Kombination mit einer geringen Vorschubkraft, führte dies dazu, dass der Bohrhammer zu stark abgehoben hat. Daraus resultierte ein größerer Abstand zwischen den Stoßkomponenten und letztendlich ein schlechtes Übertragungsverhalten der Impulse. Durch diesen Effekt wurde der Bohrhammer in einen Betriebspunkt gebracht, an dem die Zuverlässigkeit des Systems in Bezug auf die Funktionserfüllung nicht mehr gewährleistet war. Diese Hypothese erklärt, warum bei einer Vorschubkraft von 80 N eine Erhöhung der Querkraft eine deutlich stärkere Abnahme der ROP bewirkt als bei höheren Vorschubkräften. Somit konnte gezeigt werden, dass es insbesondere bei dieser Vorschubkraft zu Interaktionseffekten zwischen der Vorschub- und Querkraft kommt.

Es ist zu beachten, dass die in dieser Studie eingestellten Faktorstufen der Querkraft den beim manuellen Hammerbohren auftretenden Querkraften entsprechen. So zeigte die explorative Studie, dass Anwender beim senkrecht nach unten Bohren unter Laborbedingungen Querkraften aufbringen. Bei hohen Vorschubkräften

betragen diese Querkräfte in der Vorstudie im Median  $LF = 16.2$  N, wobei jedoch unabhängig von der Bohrrichtung Querkräfte von bis zu  $LF = 55.6$  N gemessen wurden. Darüber hinaus wurden in der Hauptstudie Querkräfte beim manuellen Hammerbohren mit einem Median von  $LF = 16.7$  N, einem 95. Perzentil von  $LF = 37.7$  N und einem Maximum von  $LF = 73.1$  N über eine Bohrung gemessen. In der kausalen Studie I konnte kein signifikanter mittlerer Unterschied der ROP für eine Querkraft von 20 N im Vergleich zu  $LF = 0$  N nachgewiesen werden. Basierend darauf kann eine relativ geringe Auswirkung auf die ROP angenommen werden, wenn geringere Querkräfte vom Anwender aufgebracht werden. Bei höheren Querkräften, wie z. B. dem 95. Perzentil, ist jedoch eine signifikante Abnahme der ROP zu erwarten. Es ist zu beachten, dass in der Hauptstudie der explorativen Studie professionelle Anwender, die im Hammerbohren erfahren sind, als Probanden eingesetzt wurden. Außerdem trifft der Anwender unter realen Arbeitsbedingungen häufiger auf Situationen mit erschwerten Randbedingungen als die in dieser Studie verwendeten Laborbedingungen. Es ist daher davon auszugehen, dass unter realen Arbeitsbedingungen größere Querkräfte auftreten könnten. Diese Hypothese gilt es jedoch in zukünftigen Studien zu überprüfen.

Für die Weiterentwicklung von Bohrern und Bohrhämmern werden derzeit im industriellen Bereich automatisierte Funktionstests durchgeführt, bei denen die Querkräfte nicht kontrolliert bzw. berücksichtigt werden. Basierend auf den Ergebnissen dieser Studie, die einen relevanten Einfluss von Querkräften auf den Bohrhammerprozess aufzeigte, wird empfohlen, bei der Untersuchung der ROP mittels entwicklungsbegleitenden automatisierten Funktionstests realistische Querkräfte aufzubringen.

## 6.4.2 Vibrationen

Ein Teilziel dieser Studie ist es, den Zusammenhang zwischen den Vorschub- und Querkräften auf die Bohrhammerschwingungen in Form des  $a_{hv}$ -Wertes zu untersuchen. Da im Stand der Forschung unterschiedliche Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen dem  $a_{hv}$ -Wert und der Vorschubkraft dokumentiert sind, wurde dieser Zusammenhang für verschiedene Bohrhammer-Bohrer-Setups untersucht.

Beim Vergleich der in dieser Studie am Prüfstand ermittelten  $a_{hv}$ -Werte am Hauptgriff mit den Herstellerangaben konnte nachgewiesen werden, dass diese sehr gut übereinstimmen. Insbesondere die Ergebnisse mit einer Vorschubkraft von 110 N und geringen Querkräften sind sehr vergleichbar. Um den  $a_{hv}$ -Wert nach der Norm DIN EN ISO 28927-10 (DIN EN ISO 28927-10) zu ermitteln, sollen in den Untersuchungen eine Vorschubkraft von 30 N oberhalb der notwendigen

Mindestvorschubkraft aufgebracht werden. Beide Bohrhämmer befinden sich etwa ab einer Vorschubkraft von 75 N in einem stabilen Betriebsbereich. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die Hersteller bei den Tests eine Vorschubkraft von ca. 110 N aufgebracht haben. Daraus kann gefolgert werden, dass der Prüfstand ohne Querkräfte grundsätzlich realistische Ergebnisse erzeugt. Inwieweit die Erkenntnisse tatsächlich übertragbar sind, wird in der Verifikationsstudie analysiert.

Bei der Bewertung von Einflüssen auf den  $a_{hv}$ -Wert ist die Berücksichtigung der Zeitsignale der Beschleunigung (Hecker & Riederer, 1985) hilfreich. Der Bohrhämmer TE 30 von Hilti zeigte geringere Amplituden, insbesondere zeigte er weniger höherfrequente Schwingungen sowohl am Gehäuse als auch am Hauptgriff als der Bohrhämmer GBH 3-28 von Bosch. Die grundsätzlich geringeren  $a_{hv}$ -Werte und Amplituden im Zeitsignal des TE 30 sind auf die größere Masse des Bohrhammers zurückzuführen. Sie können zusätzlich durch die unterschiedlichen Konzepte zur Schwingungsreduzierung verursacht werden. Bei beiden Bohrhämmern sind die aus der Forschung (Riederer, 1985) bekannten und für elektropneumatische Bohrhämmer charakteristischen Stöße im Beschleunigungssignal zu erkennen (siehe Anhang B Abbildung B.1 bis B5). Zunächst trifft das Bohrhämmergehäuse auf den Zwischenkolben (B-Stoß). Anschließend bewirkt er eine Kompression der Luftfeder (SA), die schließlich durch den Rückprall der Schlagteile (ZK) einen Schlag auslöst. Dieser kann entweder über das Dämpfungselement oder die Luftfeder auf das Gehäuse des Bohrhammers übertragen werden. Welcher Fall eintritt, hängt stark von dem Gewichtsverhältnis von Schlagkolben, Zwischenkolben und Werkzeug ab. Das gemessene Verhältnis von Schlagkolben zu Zwischenkolben beträgt beim TE 30 1.59 und beim GBH 3-28 0.73. Außerdem besitzt der GBH 3-28 ein zusätzliches Bauteil, in das der Zwischenkolben einschlagen kann. Dieses hat eine Masse von 23.7 g. Aus dem Impulserhaltungssatz lässt sich ableiten, dass es aufgrund des leichteren Zwischenkolbens beim GBH 3-28 zu Schlagvorgängen kommt, bei denen der Zwischenkolben mehrfach zwischen dem Werkzeug und dem Dämpfungselement bzw. dem Schlagkolben hin und her prallt (Riederer, 1985). Dies könnte auch zu den Mehrfachschlägen im Bereich des ZK-Schlages geführt haben. Der leichtere Zwischenkolben begünstigt weiterhin, dass die vom Beton auf den Bohrer induzierten Druckwellen auf das Gehäuse übertragen werden. Diese Druckwellen werden durch die elastische Verformung des Betons erzeugt (Hecker, 1983). Die beschriebenen Ursachen können somit die geringeren  $a_{hv}$ -Werte und Effekte im Zeitsignal der TE 30 gegenüber der GBH 3-28 erklären. Für die nachfolgende Analyse der Faktoreinflüsse bedeutet dies, dass bei Interaktionseffekte des Faktors Bohrhämmer die Veränderung der beschriebenen Ursachen und Effekte genauer

betrachtet werden sollten, um eine physikalische Erklärung für den Faktoreinfluss liefern zu können.

### **Einfluss der Vorschubkraft**

Bei der Betrachtung des Einflusses der Vorschubkraft auf den  $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse wird deutlich, dass dieser stark systemabhängig ist. Dies lässt sich durch die Versteifung des Hand-Arm-Systems des Menschen durch die Vorschubkraft erklären (Marcotte, Aldien, Boileau, Rakheja & Boutin, 2005). Im Falle des Bohrhammers von Bosch nimmt der  $a_{hv}$ -Wert bei allen Bohrern nahezu linear ab (siehe Abbildung 6.9). Hier gibt es relativ geringe Abweichungen zwischen den einzelnen Bohrerarten. Die Zeitsignale zeigen, dass die ZK-Schläge (siehe Abbildung B.6) zunächst sehr hoch waren und durch die stärkere Ankopplung immer weiter abnahmen. Dies könnte auf die erhöhte Massenankopplung des Handgriffs und insbesondere des Hand-Arm Systems zurückzuführen sein. Weiterhin wurde beobachtet, dass der B-Schlag leicht ansteigt, wenn eine höhere Vorschubkraft aufgebracht wurde. Dies hat zur Folge, dass der Bohrer bei einem starken Schlag geringfügiger vom Beton abhebt, d. h. der Bohrer setzt früher wieder auf. Dies lässt sich an dem Zeitintervall zwischen B und SA beobachten. Ein weiterer Grund für die Abnahme des  $a_{hv}$ -Wertes könnte sein, dass sich zu viel Bohrmehl im Bohrloch befindet, wodurch die Reibung erhöht wird und dazu führt, dass der Bohrer auf das Bohrklein bzw. Bohrmehl trifft (Hecker, 1983).

Im Falle des Hilti-Bohrhammers verursachten die drei Bohrerarten ein unterschiedliches Verhalten des  $a_{hv}$ -Wertes. Beim Wendelbohrer mit vier Schneidkanten nahm der B-Schlag (siehe Abbildung B.7), der bei  $FF = 80$  N nicht sichtbar war oder bei  $110$  N alternierend vorlag (Riederer, 1985; Schäfer, 2018), mit höherer Vorschubkraft zu. Im Gegenzug wurde jedoch die Impulsdauer der Schläge von ZK kürzer. Da davon auszugehen ist, dass diese Effekte sich gegenseitig aufhoben, konnte für diesen Fall kein Einfluss der Vorschubkraft auf den  $a_{hv}$ -Wert nachgewiesen werden. Bei beiden zweischneidigen Bohrern stiegen die  $a_{hv}$ -Werte bei der Erhöhung der Vorschubkraft zunächst an und nahmen anschließend ab bzw. stiegen beim zweischneidigen Wendelbohrer bei höheren Vorschubkräften erneut an. Im Zeitsignal des Hohlbohrers ist zu erkennen, dass B, SA und ZK extrem ansteigen und bei einer Vorschubkraft von  $230$  N wieder abfallen. Die sehr starke Überhöhung bei  $FF = 140$  und  $170$  N könnte durch eine Verschiebung des Betriebspunktes des Schlagwerks in einen suboptimalen Bereich verursacht worden sein.

Wird der Einfluss der Vorschubkraft auf den  $a_{hv}$ -Wert am Hauptgriff betrachtet, so zeigten die beiden Bohrhämmer einen qualitativ unterschiedlichen Verlauf (siehe

Abbildung 6.9). Oddo et al. (2004) zeigten durch den Einsatz unterschiedlicher Griffentkopplungen an einem shakerbasierten Prüfstand, dass sowohl die Art der Schwingungsentkopplung als auch die Andruckkraft einen Einfluss auf das Schwingungsverhalten haben. Weitere Studien (Aldien et al., 2005; Aldien, Marcotte, Rakheja & Boileau, 2006; Marcotte et al., 2005) zeigten, dass die mechanische Impedanz des Menschen durch die Andruckkraft zunimmt. Die unterschiedlichen  $a_{hv}$ -Kurven der beiden Bohrhämmer müssen also aus der Wechselwirkung zwischen dem technischen System und der Vorschubkraft resultieren. Beim TE 30 verhielten sich die  $a_{hv}$ -Werte relativ gesehen fast identisch zu denen am Gehäuse, sind aber bei den beiden Wendelbohrern stark reduziert. Beim Hohlbohrer übertrafen die Schwingungen am Hauptgriff teilweise sogar die am Gehäuse. Die größere Streuung beim Hohlbohrer resultiert aus dem starken Einfluss der Querkraft. Bei niedriger Vorschubkraft war die größte Streuung vorhanden, die vermutlich aus alternierenden B-Schlägen (siehe Abbildung B.8) resultierte (Riederer, 1985). Diese traten bei höheren Vorschubkräften bei jedem Bohrhammerschlag auf, was dazu führte, dass die Streuung deutlich kleiner wurde.

Beim GBH 3-28 stieg der  $a_{hv}$ -Wert zunächst bei allen Wendelbohrern an (siehe Abbildung 6.9). Dieser Anstieg lässt sich durch eine Erhöhung des ZK- und des B-Schlags, bedingt durch die erhöhte Vorschubkraft, erklären (siehe Abbildung B.8). Insbesondere bei dem zweischneidigen Wendelbohrer sank der  $a_{hv}$ -Wert bei höheren Vorschubkräften wieder ab. Wie auch bei den Daten für den Bohrer mit vier Schneidkanten zu erkennen ist, verringerten sich die Amplituden der Schläge ZK und B bei höheren Vorschubkräften. Diese Erscheinung könnte, wie bereits vermutet, durch das Bohrmehl im Bohrloch verursacht werden (Hecker, 1983).

### **Einfluss der Querkraft**

Bei der Betrachtung des Einflusses der Querkraft auf den  $a_{hv}$ -Wert am Hauptgriff und am Gehäuse (siehe Abbildung 6.11) wird deutlich, dass die relativen Kurvenverläufe der beiden Bohrhämmer weitgehend vergleichbar sind. Am Hauptgriff stieg der  $a_{hv}$ -Wert durch eine Erhöhung der Querkraft an. Anhand der Rohsignale (siehe Abbildung B.1 und B.2) kann geschlossen werden, dass dies aus den höheren Amplituden des ZK-Schlags sowie des B-Schlags resultiert. Dieses Verhalten lässt sich dadurch erklären, dass der Hauptgriff zwar gegenüber den Vorschubkräften in Bohrrichtung schwingungsentkoppelt ist, die Entkopplung aber gegenüber den Querkraften nur bis zu einem gewissen Grad funktioniert. Durch das Aufprägen von Querkraften wird die Schwingungsentkopplung überbrückt und der Hauptgriff starrer an das Bohrhämmergehäuse gekoppelt. Dadurch konnten die Schwingungen weniger stark gedämpft werden. Durch diese Begründung kann auch der gegenteilige Effekt auf das Bohrhämmergehäuse erklärt werden. Obwohl der

$a_{HV}$ -Wert zunächst anstieg, sobald Querkräfte auf den GBH 3-28 und auf den TE 30 in Kombination mit dem Hohlbohrer einwirkten, sank der  $a_{HV}$ -Wert mit zunehmenden Querkräften. Der Anstieg ist durch die höheren Nachschwingungen im Bereich der ZK zu erklären. Bisher sind keine Studien bekannt, die den Einfluss von Querkräften auf die mechanische Impedanz des Menschen untersuchten. Aus den Ergebnissen ist jedoch zu vermuten, dass vergleichbar zur Vorschubkraft eine Erhöhung der Querkraft zu einer Erhöhung der Impedanz führt. Durch die dadurch entstehende Überbrückung der Schwingungsentkopplung wird mehr Masse mit dem Gehäuse verbunden, was die Schwingungen reduziert. Zur Erklärung der abfallenden Zeitsignale ist aus der Schwingungskurve zu erkennen, dass sich weder der B-Schlag noch der SA-Schlag entscheidend verändert haben. Im Falle des Bohrhammers von Bosch wurde jedoch der Zwischenschlag (zwischen B und SA) stark reduziert. Bei dem Bohrhammer von Hilti (siehe Abbildung B.3 – B.5) hat sich zudem der 3. Peak des ZK-Schlages stark verringert. Dies könnte auf die Überbrückung der Schwingungsentkopplung bzw. die steifere Anbindung zurückzuführen sein, wodurch mehr Masse des Hauptgriffs und insbesondere des HAM an das Bohrhammergehäuse gekoppelt wird. Beim Vergleich der Bohrertypen in Kombination mit dem TE 30 wird deutlich, dass sich die beiden Wendelbohrer mit vergleichbarem Gewicht und Länge sehr ähnlich verhielten. Die steilere Kurve des  $a_{HV}$ -Wertes beim Hohlbohrer resultiert möglicherweise aus den höheren  $a_{HV}$ -Werten bei höheren Vorschubkräften. Wie bei den Wendelbohrern wurde hierbei ebenso die Schwingungsentkopplung durch das Aufbringen von Querkräften überbrückt. Somit stiegen mit den höheren  $a_{HV}$ -Werten, hervorgerufen durch die Vorschubkraft, auch die  $a_{HV}$ -Werte bei höheren Querkräften.

Die in dieser Studie durchgeführten Untersuchungen bezüglich der Querkraft sind bisher in keiner anderen wissenschaftlichen Studie nachgewiesen worden. Dadurch fehlen Vergleichswerte, um die Ergebnisse einordnen zu können. Die Studie zeigte, dass eine Erhöhung der Querkraft den  $a_{HV}$ -Wert am Hauptgriff erhöht, dass aber das Gegenteil für das Gehäuse gilt. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass der Zusammenhang zwischen den Querkräften sowie den Vorschubkräften stark systemabhängig ist. Da der Anwender insbesondere im Feld Querkräfte aufbringt, sollten diese in den Normen zur Ermittlung des bohrhammerspezifischen  $a_{HV}$ -Wertes berücksichtigt werden. So könnten beispielsweise spezifische Tests mit und ohne Querkräfte durchgeführt werden. Wie bereits gezeigt, sind die Zusammenhänge zwischen den Anwenderkräften und den Schwingungen für jedes Bohrhammer-setup unterschiedlich. Darauf aufbauend sollte analysiert werden, ob dies primär von der Art der Griffentkopplung oder vom Gesamtsystem abhängt. Hierbei wäre es bedeutsam, weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Geräten der beiden Hersteller mit identischen Schwingungsentkopplungskonzepten durchzuführen.

Die gewonnenen Erkenntnisse können ebenso von den Herstellern für die nutzerzentrierte Entwicklung von Bohrhämmern genutzt werden. Ein Entwicklungsziel könnte die Reduzierung des  $a_{HV}$ -Wertes sein. Eine Reduktion von beispielsweise  $18 \text{ m/s}^2$  auf  $13 \text{ m/s}^2$  (siehe Abbildung 6.11 Beschleunigung am Hauptgriff des Bosch-Bohrhammers) führt zu einer Verdoppelung der Nutzungsdauer je Tag von 30 auf 60 min (DIN CEN/TR 15350). Ein möglicher Ansatz ist die Integration von Elastomeren an der Anbindung des Hauptgriffs in Querrichtung. Hierbei muss jedoch weiterhin gewährleistet sein, dass der Bohrerhammer mit dem Hauptgriff stabil geführt werden kann (Gillmeister, 1998). Mit Hilfe von Beschleunigungssensoren, die bereits in einigen kommerziell erhältlichen Bohrhämmern eingebaut sind, könnten auch während des Betriebs die  $a_{HV}$ -Werte ermittelt werden, und sobald diese ansteigen, könnte dem Anwender eine Rückmeldung gegeben werden, welche der Anwennerkräfte reduziert werden sollten. Dies sollte durch das Wissen, welche Schwingungseigenschaften bei unterschiedlichen Kräften auftreten, möglich sein.

## 6.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde zunächst der für die kausalen Studien genutzte Prüfstand vorgestellt. Hierbei wurde ein Schwerpunkt auf die Charakterisierung der Regelung und die Überprüfung der Absolut- und Wiederholgenauigkeit gelegt. Es konnte gezeigt werden, dass die Regelung schnell genug reagiert, damit zum einen eine ausreichende Auswertedauer zur Berechnung der Bewertungsgrößen gegeben war, und zum anderen die Sollwerte reproduzierbar eingestellt werden konnten.

Anhand der durchgeführten Studie konnte gezeigt werden, dass die Querkraft einen negativen Einfluss auf die Vorschubgeschwindigkeit hat. Zwischen  $LF = 0$  und  $20 \text{ N}$  verändert sich die Vorschubgeschwindigkeit nicht, und nimmt danach linear ab. Der ermittelte relative Verlauf trifft auf alle untersuchten Bohrerhammer-Bohrer-Setups zu. Eine weitere Erkenntnis ist der erforschte Interaktionseffekt zwischen der Querkraft und der Vorschubkraft. Bei einer Vorschubkraft von  $80 \text{ N}$  fällt die Vorschubgeschwindigkeit bei der Aufbringung einer Querkraft deutlich stärker ab. Dies wurde auf die Verschiebung des Betriebspunkts in einen instabilen Bereich zurückgeführt. Anhand der Variation des Faktors Vorschubkraft konnte gezeigt werden, dass diese grundsätzlich einen positiven Zusammenhang mit der Vorschubgeschwindigkeit hat. Dieser Zusammenhang hängt jedoch stark vom Bohrerhammer-Bohrer-Setup ab und ist somit nur für die hier untersuchten Systeme gültig. Durch die Erkenntnisse dieser Arbeit, dass professionelle Anwender beim Hammerbohren Querkräfte aufbringen und diese einen Einfluss auf die Produktivität haben, sollten diese auch in die Entwicklung von Bohrerhammer und Bohrer

miteinfließen. Bei der Optimierung und Bewertung des technischen Systems sollte deshalb sowohl in Simulationen als auch im Testing unterschiedliche Querkraftlevels abgebildet werden. Da der relative Verlauf über alle Setups vergleichbar war, ist es zumeist ausreichend Extremwerte abzubilden. Erst dies erlaubt eine realitätsnahe Bewertung der systemabhängigen Produktivität.

Die Analyse der  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse und am Hauptgriff hatte ergeben, dass der Einfluss der Quer- und Vorschubkraft sehr stark vom Bohrhammer abhängen und somit nicht verallgemeinert werden kann. Der Bohrertyp hat hingegen einen deutlich geringeren Einfluss. Somit konnten für alle Faktoren Interaktionseffekte nachgewiesen werden. Vergleichbar zur Bewertung der Produktivität ist es bei der Bohrhammerbeschleunigung höchst relevant Querkräfte während dem Entwicklungsprozess zu simulieren. Da hierbei im Gegensatz zur Produktivitätsanalyse kein linearer Verlauf, welcher größtenteils auf unterschiedliche Setups übertragbar ist, vorliegt, sollten bei der Beschleunigungsbewertung eine größere Anzahl an Querkraftstufen aufgebracht und diese für alle relevanten Setups untersucht werden.

Die Schlagfrequenz wird sowohl von der Quer- als auch Vorschubkraft negativ beeinflusst. Die Erkenntnisse sind weitgehend auf die unterschiedlichen Setups übertragbar, wobei die Frequenz bei den Versuchen mit Hohlbohrern weniger stark vermindert wurden.

## 7 Querkrafteinfluss in Interaktion mit Bohrerverschleiß und Beton (Kausale Studie II)

Das vorherige Kapitel hat gezeigt, dass die Querkraft und Vorschubkraft einen Einfluss auf die Bewertungsgrößen Vorschubgeschwindigkeit und  $a_{hv}$ -Wert haben. Um ein Produkt gezielt gegen den Einfluss der Anwenderkräfte optimieren zu können, müssen alle Interaktionseffekte mit bekannten Einflussgrößen bekannt sein. Anhand des aktuellen Stands der Forschung konnte gezeigt werden, dass sich über die Bohrzeit die Geometrie des Bohrers stark verändert (Botti et al., 2020). Der Bohrerverschleiß und ebenso die Betonfestigkeit beeinflussen in starkem Maße den  $a_{hv}$ -Wert sowie die Vorschubgeschwindigkeit (Botti et al., 2020; Carty et al., 2017; Weinert et al., 1993). Es fehlt jedoch das Wissen, ob es zwischen dem Verschleiß, der Betonfestigkeit und den Anwenderkräften zu Interaktionseffekten bezüglich der ROP und des  $a_{hv}$ -Wertes kommt. Ebenso wurde in diesen Untersuchungen nie der Einfluss der Vorschub- oder Querkraft sowie der Betonfestigkeit auf den Verschleiß des Bohrers behandelt. Dieses Wissen wird benötigt, um eine Erklärung für mögliche Interaktionseffekte finden zu können.

In dem vorangegangenen Experiment wurde der Verschleiß als Störgröße betrachtet. In diesem Experiment wurde zunächst der Einfluss des Verschleißes in Interaktion mit den unabhängigen Variablen, insbesondere der Querkraft, auf die beiden Bewertungsgrößen Vorschubgeschwindigkeit und den  $a_{hv}$ -Wert erforscht. Da der Verschleiß sich über die Bohrdauer zwar verändert, jedoch nicht gezielt eingestellt wird, werden in dieser Untersuchung die kumulierten Bohrmeter als Faktor berücksichtigt. Dieser kann in gewissem Maße mit dem Bohrerverschleiß gleichgesetzt werden. In einem zweiten Schritt wurde der Einfluss der unabhängigen Variablen auf den Verschleiß analysiert.

*Das methodische Vorgehen, die Ergebnisse und die Diskussion dieses Kapitels basieren auf der Veröffentlichung:*

*„Analysis of Drill Bit Wear and its Influence on Productivity and Vibrations in Interaction with Feed and Lateral Force“ (Uhl, Gauch, Robens, Gwosch & Matthiesen, 2022)*

*Abbildungen und Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus der Veröffentlichung übernommen. Im Gegensatz zu den Abbildungen werden die Texte aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.*

## 7.1 Fragestellungen

In diesem Kapitel wird die Forschungsfrage 4 beantwortet:

*FF 4: Wie beeinflusst die Querkraft in Interaktion mit dem Bohrerverschleiß die Größen Vorschubgeschwindigkeit sowie  $a_{hv}$ -Wert unter Berücksichtigung der Vorschubkraft, den kumulierten Bohrmeter und der Betonfestigkeit?*

Diese Forschungsfrage wird anhand zweier untergeordneten Forschungsziele untersucht. Im Gegensatz zur vorherigen Studie wird in diesem Experiment insbesondere die Interaktion der Querkraft mit den Größen Verschleiß, Betonfestigkeit und Bohrerhersteller analysiert. Durch die Interaktionseffekte der Querkraft mit den zusätzlichen Faktoren soll erneut eine Übertragbarkeit der Ergebnisse nachgewiesen werden. Zusätzlich werden die Haupteffekte der Faktoren Betonfestigkeit, kumulierte Bohrmeter, Vorschubkraft und Bohrerhersteller analysiert. Durch einen Vergleich dieser Haupteffekte mit der explorativen Studie und dem Stand der Forschung kann aufgezeigt werden, ob mit Hilfe des Prüfstands ein realistisches Verhalten des Bohrhammers abgebildet wird. Mit Hilfe der Studie sollen die folgenden beiden Fragen analysiert werden:

*Beeinflusst die Querkraft in Interaktion mit dem Verschleiß die beiden Bewertungsgrößen  $a_{hv}$ -Wert und Vorschubgeschwindigkeit?  
Sind diese Einflüsse auf unterschiedliche Betonarten, Vorschubkräfte und Bohrerhersteller übertragbar?*

Durch eine anschließende Analyse soll geklärt werden, ob die untersuchten Faktoren einen Einfluss auf den Bohrerverschleiß haben. Erst diese Analyse erlaubt es, mögliche Effekte erklären zu können. Hierzu soll die Frage beantwortet werden:

*Beeinflussen die Quer-, Vorschubkraft, Betonfestigkeit und der Bohrerhersteller den Verschleiß des Bohrers?*

## 7.2 Methodisches Vorgehen

In diesem Unterkapitel werden der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die Datenauswertung beschrieben.

### 7.2.1 Versuchsaufbau

In dieser Studie wurde ein Bohrhämmer GBH 3-28 DRE mit einer SDS-plus Bohrhämmeraufnahme (Modell GBH 3-28 DRE, Robert Bosch Power Tools GmbH, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland) und einem Gewicht von 3.6 kg verwendet. Der Bohrhämmer ist somit identisch zu der vorangegangenen Studie. Der frequenzbewertete Beschleunigungswert des Bohrhammers wurde vom Hersteller mit  $14.5 \text{ m/s}^2$  mit einer Unsicherheit von  $1.6 \text{ m/s}^2$  angegeben. Bei den in der Studie verwendeten Bohrerarten handelt es sich um einen BOSCH SDS plus-7X Bohrer ( $\text{Ø}10 - 150 \text{ mm}$  Arbeitslänge, Gewicht: 91 g, SDS plus-7X, Robert Bosch Power Tools GmbH, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland) und einen Hilti TE-CX Bohrer ( $\text{Ø}10 - 150 \text{ mm}$ , Gewicht: 81 g, Typ TE-CX (SDS plus), Hilti AG, Schaan, Liechtenstein). Beide Bohrer hatten vier Schneidkanten und eine Vollhartmetallspitze. Die Betonblöcke hatten die Abmessungen  $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  (C 50/60 - Rau-Betonfertigteile, Ebhausen, Deutschland) und  $2400 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  (C 20/25 - Rau-Betonfertigteile, Ebhausen, Deutschland). Damit erfüllten beide die Mindestanforderungen der DIN EN ISO 28927-10 (DIN EN ISO 28927-10). Die Mindestdruckfestigkeit der Würfel nach 28 Tagen Aushärtung betrug  $25 \text{ N/mm}^2$  für C 20/25 und  $60 \text{ N/mm}^2$  für C 50/60. Dies ist in Anlehnung an DIN EN 206 (DIN EN 206) festgelegt. Alle Betonsteine stammten aus der gleichen Charge.

In diesem Experiment wurde die gleiche Versuchsumgebung und Messtechnik verwendet wie im vorherigen Experiment (siehe Kapitel 6.2.1) und wird deshalb nicht erneut beschrieben.

### 7.2.2 Versuchsablauf

Der grundsätzliche Versuchsablauf entspricht dem aus dem vorherigen Experiment (siehe Kapitel 6.2.2). Aufgrund dessen wird im Folgenden lediglich auf das Versuchsdesign eingegangen.

In dieser Studie wurden der Bohrer (Herstellertyp 0: Hilti 1: Bosch), die Vorschubkraft (110 und 170 N), die Querkraft in x-Richtung (0 und 60 N) und die Betonfestigkeit (C 20/25 und C 50/60) variiert. Es wurde ein vollfaktorielles

randomisierter Versuchsplan mit einer Wiederholung durchgeführt. Mit jedem Bohrer wurden 150 Löcher gebohrt (insgesamt 4800 Durchläufe).

Tabelle 7.1: Faktorstufen der unabhängigen Variablen für die kausale Studie II

Faktor	Faktorstufe 1	Faktorstufe 2
Vorschubkraft [N]	110	170
Querkraft [N]	0	60
Betonfestigkeit	C 20/25	C 50/60
Bohrerhersteller	Hilti	Bosch

### 7.2.3 Datenauswertung

Die Datenauswertung wurde mit MATLAB (R2020b, MathWorks, Natick (Massachusetts), USA) durchgeführt. Bei der Berechnung der ROP wurde das gleiche Vorgehen wie in Kapitel 5.1.2.4 gewählt. Die Berechnung der  $a_{hv}$ -Werte erfolgte erneut nach DIN EN ISO 5349-1 (DIN EN ISO 5349).

Die Verschleißmessungen an den Bohrerspitzen (siehe Abbildung 7.1) wurden mit einem Digitalmikroskop (Modell VHX-6000, KEYNCE DEUTSCHLAND GmbH, Neulsenburg, Deutschland) durchgeführt. Mit den Objektiven VH-Z20R/VH-Z20W/VH-Z20T 20x bis 200x und VH-Z100UR/VH-Z100UW/VH-Z100UT 100x bis 1000x war es möglich, die Geometrie der Spitze zu messen. Der Verschleißzustand des Bohrers wurde mit dem Digitalmikroskop während drei verschiedenen Zuständen analysiert. Zunächst wurde der Ausgangszustand anhand zwei mit 90° zueinander versetzten 2-D-Bildern dokumentiert. Dieser Vorgang wurde erneut nach 10.5 und 21 kumulierten Bohrmetern wiederholt. Die hierbei ermittelten Maße sind der Abbildung 7.1 und die Notation der daraus untersuchten Verschleißgrößen sind der Tabelle 7.2 zu entnehmen. Der Durchmesser der Wendel wurde mit einem Messschieber mit einem Abstand von 10, 60 und 100 mm ab dem Übergang der Hartmetallkopfes zur Wendel gemessen.

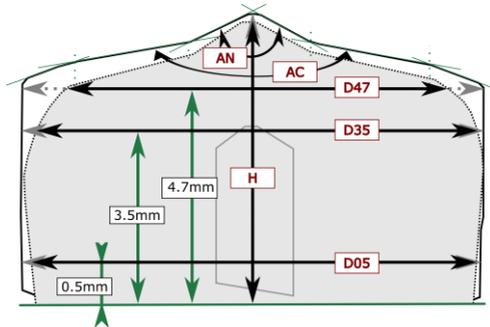


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung der ausgewerteten Parameter an der Bohrerspitze inklusive Originalmaße (grau gestrichelt), Maße nach dem Bohren (schwarz) und Hilfslinien (grün). (Uhl, Gauch et al., 2022)

Um die Verschleißergebnisse an der Wendel (siehe Abbildung 7.2) sowie an der Bohrerspitze (siehe Abbildung 7.1) im Hinblick auf weitere Einflüsse besser diskutieren zu können, wurde das Bohrgewicht zu Beginn und nach 21 Bohrmetern gemessen. Dazu wurden die Bohrer im Ultraschallbad gereinigt und anschließend deren Gewicht mit einer Präzisionswaage (Modell I2000 D, Sartorius AG, Göttingen, Deutschland), welche eine Genauigkeit von 0.001 g aufweist, gemessen.

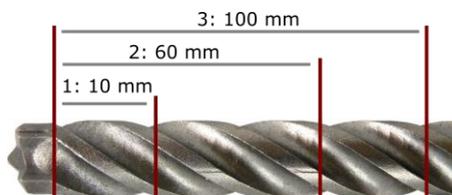


Abbildung 7.2: Ausgewertete Messpunkte (1: 10 mm, 2: 60 mm, und 3: 100 mm) an der Bohrerwendel. (Uhl, Gauch et al., 2022)

Die anschließende statistische Auswertung erfolgte mit der Software SPSS (IBM SPSS Statistics 25, IBM, Armonk (New York), USA). Anschließend wurden die Daten mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung geprüft und eine zusätzliche Überprüfung mit Histogrammen vorgenommen. Je nach Ergebnis wurde ein parametrischer oder nicht-parametrischer Test gewählt. Für die Analyse des Bohrerverschleißes wurden nur nicht-parametrische Tests angewendet. Eine zweifaktorielle Varianzanalyse nach Friedman für gepaarte Stichproben wurde verwendet, um festzustellen, ob sich das Gewicht der Bohrer über die kumulierten Bohrmeter signifikant veränderte. Zur Analyse des Einflusses der Faktoren auf den Wendeldurchmesser wurde der Mann-Whitney-U-Test genutzt. Der Einfluss auf die Geometrie der Bohrerspitze wurde sowohl mit dem Friedman-Test als auch mit dem Mann-Whitney-U-Test ermittelt. Der Zusammenhang der unabhängigen Variablen mit der ROP und dem  $a_{HV}$ -Wert wurde mit Hilfe einer multifaktoriellen ANOVA erforscht. Im Kapitel *Ergebnisse* wurden Mittelwerte ( $M$ ), Median ( $Mdn$ ), Standardabweichung ( $SD$ ) und Interquartilsabstand ( $IQA$ ) angegeben. P-Werte  $< .05$  wurden als signifikant angesehen. In dieser Arbeit wird die Notation bezüglich der statistischen Schreibweise entsprechend den Vorgaben der Deutschen Gesellschaft für Psychologie gehalten. Daraus folgt insbesondere, dass eine Null vor dem Dezimaltrennzeichen angegeben wird, wenn der Zahlenwert größer als Null werden kann. Bei statistischen Größen, bei welchen dies nicht möglich ist, entfällt die Null. Die Stellen nach dem Dezimaltrennzeichen werden auf zwei Stellen gerundet, außer bei Wahrscheinlichkeitsangaben. Um ein einheitliches Erscheinungsbild in dieser Arbeit zu erhalten, wird als Dezimaltrennzeichen ein Punkt gewählt.

Tabelle 7.2: Notation der untersuchten Verschleißgrößen

Notation	Beschreibung
AC	Schneidkantenwinkel
AN	Winkel an der Bohrerspitze
D05	Durchmesser der Spitze bei 0.5 mm
D35	Durchmesser der Spitze bei 3.5 mm
D47	Durchmesser der Spitze bei 4.7 mm
H	Höhe des Bohrkopfs

## 7.3 Ergebnisse

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse dieses Experiments beschrieben. Hierbei wird zunächst der Einfluss auf die Produktivität in Form der Vorschubgeschwindigkeit dargestellt. Anschließend folgt die Untersuchung der Bohrhammervibrationen sowie des Bohrerverschleißes.

### 7.3.1 Produktivität

Um zu analysieren, ob die Faktoren Vorschubkraft, Querkraft, Beton und Bohrerhersteller sowie deren Wechselwirkungen einen Einfluss auf den ROP haben wurde eine mehrfaktorielle ANOVA durchgeführt. Tabelle 7.3 fasst das Ergebnis der ANOVA zusammen. Das Modell hat ein adjustiertes  $R^2$  von .668. Jeder der untersuchten Faktoren ist in diesem Modell signifikant ( $p < .001$ ). Unter den Faktorkombinationen sind nur die Kombinationen *Beton\*Vorschubkraft* und *Querkraft\*Bohrmeter* nicht signifikant. Wird die Effektstärke  $f$  betrachtet, haben die Faktoren *Beton* ( $f = 1.2$ , C 20/25:  $M = 8.3$  mm/s, C 50/60:  $M = 6.7$  mm/s) und *kumulierte Bohrmeter* ( $f = 0.67$ , 0 m:  $M = 8.1$  mm/s, 10.5 m:  $M = 7.5$  mm/s, 21 m:  $M = 6.9$  mm/s) einen großen Einfluss. Dagegen haben die *Querkraft* ( $f = 0.12$ , 0 N:  $M = 7.6$  mm/s, 60 N:  $M = 7.4$  mm/s) sowie die Faktorkombinationen *Beton\*Bohrmeter* ( $f = 0.23$ ), *Hersteller\*Beton* ( $f = 0.12$ ) und *Hersteller\*Vorschubkraft* ( $f = 0.1$ ) einen geringen Einfluss. Bei den Faktoren *Hersteller* und *Vorschubkraft* haben beide nahezu keinen Einfluss.

Tabelle 7.3: Ergebnis der multifaktoriellen ANOVA zur Analyse der Einflussfaktoren (C = Beton, ToM = Hersteller, FF = Vorschubkraft, LF = Querkraft, CDM = kumulative Bohrmeter) auf die ROP (n = 4800).

Quelle	df	F	$\eta^2$
ToM	1	44.974***	.009
C	1	7442.946***	.591
FF	1	20.783***	.004
LF	1	80.830***	.015
CDM	2	1156.546***	.310
C * CDM	2	138.000***	.051
ToM * C	1	74.475***	.014
C * LF	1	38.514***	.007
C * FF	1	.379	.000
ToM * CDM	2	8.579***	.003
LF * CDM	2	1.940	.001
FF * CDM	2	15.517***	.006
ToM * LF	1	4.677*	.001
ToM * FF	1	52.231***	.010
FF * LF	1	38.036***	.007
Fehler	5141		
Gesamt	5162		

In Abbildung 7.3 sind die Kurven der Vorschubgeschwindigkeit über die kumulierten Bohrmeter dargestellt. Da kein Unterschied zwischen den verschiedenen Herstellern nachgewiesen werden konnte, wurden diese nicht getrennt dargestellt. Somit enthält jede Kurve vier Bohrserien (4x150 Bohrungen). Wie anhand der ANOVA bereits gezeigt wurde, kann in dem Diagramm der starke Einfluss des Betons und des Verschleißes nachvollzogen werden. Durch die unterschiedlichen Steigungen der Kurven mit C 20/25 sowie C 50/60 sind ebenfalls die

nachgewiesenen Interaktionseffekte der Betonfestigkeit mit den kumulierten Bohrmeter zu erkennen. Anhand des Diagramms wird weiterhin deutlich, dass bei Versuchsdurchläufen mit C 50/60 die ROP bei einer Vorschubkraft von 170 N zunächst höher war. Mit zunehmenden kumulierten Bohrmeter und Bohrerverschleiß nähern sich die Werte der ROP den Versuchsdurchläufen mit einer Vorschubkraft von 110 N jedoch an und kreuzen sich zumindest bei einem höherfesten Beton die Kurven sogar (LF = 0 N: nach 14 CDM, LF = 60 N: nach 7 CDM). Bei C 20/25 nähern sich die Kurven im untersuchten Bereich immer mehr an, kreuzen sich aber in dem untersuchten Bereich nicht.

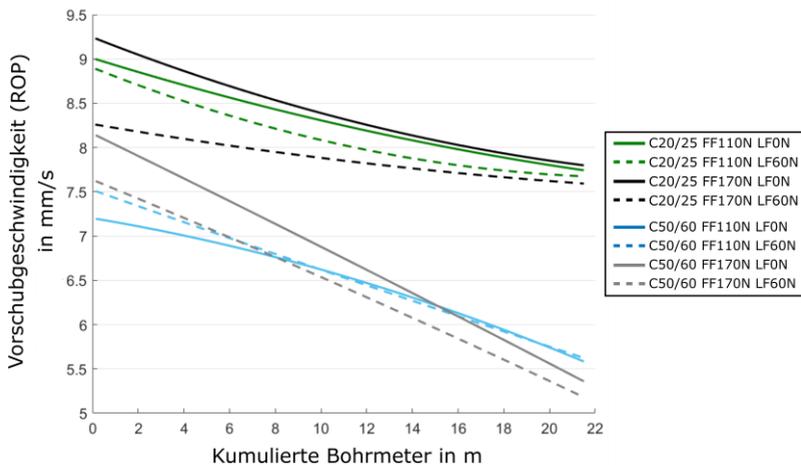


Abbildung 7.3: Verlauf der Vorschubgeschwindigkeit (ROP) über kumulative Bohrmeter für jeden Beton (C), Vorschubkraft (FF) und Querkraft (LF). Die Grafik umfasst 4800 Versuchsdurchläufe, wobei jede Kurve auf 600 Versuchsdurchläufe (4 Bohrer mit je 150 Bohrungen) basiert (Übersetzt von Uhl, Gauch et al., 2022)

### 7.3.2 Vibration

Um zu analysieren, welche der Faktoren die Bohrhammervibration beeinflussen, wurde ebenfalls eine multifaktorielle ANOVA mit Haupteffekten und einfachen Interaktionen sowohl für den  $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse als auch für den Hauptgriff durchgeführt. Das für den Hauptgriff erstellte Modell hat ein adjustiertes  $R^2$  von .728.

Es zeigte sich, dass alle Faktoren und Faktorkombinationen statistisch signifikant waren. Bis auf die Kombination *Hersteller\*Kumulierte Bohrmeter* ( $p < .05$ ) haben alle einen  $p$ -Wert von kleiner als .001. Durch Berechnung des Cohens  $f$  aus dem partiellen  $\eta^2$  (beschrieben in Anhang C Tabelle C.2:) zeigte sich, dass ein starker Effekt für die *Querkräft* nachgewiesen werden konnte ( $f = 0.93$ , 0 N:  $M = 12.9 \text{ m/s}^2$ , 60 N:  $M = 15.7 \text{ m/s}^2$ ), den *Beton* ( $f = 0.62$ , C 20/25:  $M = 15.2 \text{ m/s}^2$ , C 50/60:  $M = 13.4 \text{ m/s}^2$ ) und der *Hersteller* ( $f = 0.49$ , 0:  $M = 15 \text{ m/s}^2$ , 1:  $M = 13.6 \text{ m/s}^2$ ). Für die Faktoren *Vorschubkräft* ( $f = 0.34$ , 110 N:  $M = 14.8 \text{ m/s}^2$ , 170 N:  $M = 13.8 \text{ m/s}^2$ ) und *kumulierte Bohrmeter* ( $f = 0.32$ , 0 m:  $M = 14.9 \text{ m/s}^2$ , 10.5 m:  $M = 14.3 \text{ m/s}^2$ , 21 m:  $M = 13.7 \text{ m/s}^2$ ) sowie den Kombinationen *Beton\*Bohrmeter* ( $f = 0.28$ ), *Beton\*Querkräft* ( $f = 0.36$ ) und *Hersteller\*Querkräft* ( $f = 0.3$ ) konnte eine mittlere Effektstärke nachgewiesen werden. Für alle weiteren Kombinationen konnte keine oder nur eine geringere Effektstärke nachgewiesen werden. Abbildung 7.4 und Abbildung 7.5 zeigen die  $a_{hv}$ -Werte am Hauptgriff sowie an dem Gehäuse über die *kumulierten Bohrmeter*. In den nachfolgenden Diagrammen wurden die *Hersteller* ebenfalls nicht unterschieden.

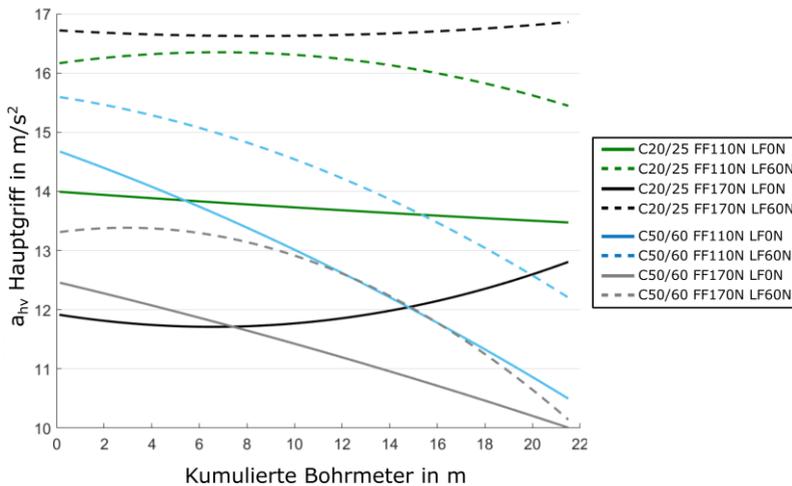


Abbildung 7.4: Verlauf der  $a_{hv}$ -Werte des Hauptgriffs über kumulierte Bohrmeter für die Faktoren Beton (C), Vorschubkräft (FF) und Querkräft (LF). Jede Kurve umfasst 600 Versuchsdurchläufe (4 Bohrer x150 Bohrungen) und das Diagramm 4800 Versuchsdurchläufe insgesamt. (Übersetzt von Uhl, Gauch et al., 2022)

Das Modell für die  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse hatte ein adjustiertes  $R^2$  von .844. Bis auf die Kombination *Hersteller\*Beton* sind alle Faktoren und Faktorkombinationen statistisch signifikant. Hinsichtlich der Effektstärke ließ sich ebenfalls zeigen, dass die *Querkraft* mit einem  $\eta^2 = .531$  ( $f = 1.06$ , 0 N:  $M = 18.1 \text{ m/s}^2$ , 60 N:  $M = 15 \text{ m/s}^2$ ) den größten Einfluss hatte. Im Gegensatz zur Analyse am Hauptgriff hatte nun die *Vorschubkraft* den zweitgrößten Einfluss ( $f = 0.68$ , 110 N:  $M = 17.6 \text{ m/s}^2$ , 170 N:  $M = 15.6 \text{ m/s}^2$ ), gefolgt von *Beton* ( $f = 0.59$ , C 20/25:  $M = 17.4 \text{ m/s}^2$ , C 50/60:  $M = 15.7 \text{ m/s}^2$ ) und *Hersteller* ( $f = 0.5$ , 0:  $M = 17.3 \text{ m/s}^2$ , 1:  $M = 15.8 \text{ m/s}^2$ ), die ebenfalls einen starken Effekt hatten. Die *kumulierten Bohrmeter* ( $f = 0.33$ , 0 m:  $M = 17.2 \text{ m/s}^2$ , 10.5 m:  $M = 16.4 \text{ m/s}^2$ , 21 m:  $M = 16.1 \text{ m/s}^2$ ) und die Faktorkombinationen *Beton\*kumulierte Bohrmeter* ( $f = 0.32$ ) und *Vorschubkraft\*Querkraft* ( $f = 0.4$ ) hatten einen mittleren Effekt.

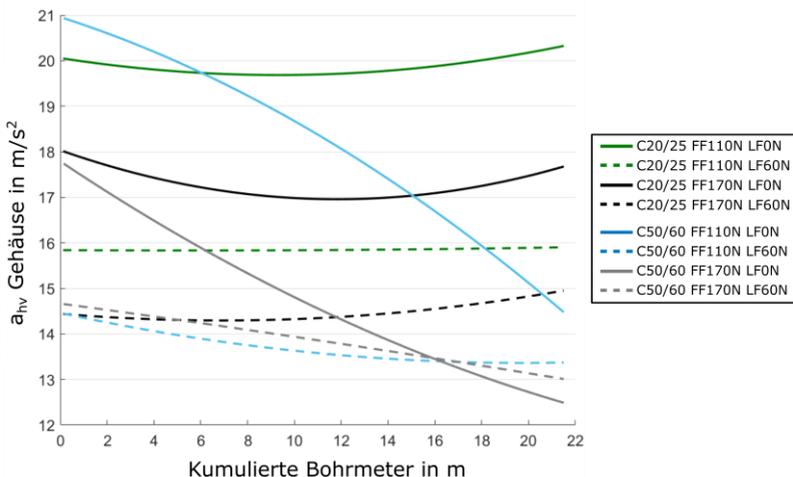


Abbildung 7.5: Verlauf der  $a_{hv}$ -Werte des Gehäuses über kumulierte Bohrmeter für die Faktoren Beton (C), Vorschubkraft (FF) und Querkraft (LF). Die Grafik umfasst 4800 Versuchsdurchläufe, wobei jede Kurve auf 600 Versuchsdurchläufe (4 Bohrer mit je 150 Bohrungen) basiert. (Übersetzt von Uhl, Gauch et al., 2022)

### 7.3.3 Verschleiß

#### 7.3.3.1 Gewichtsveränderungen des Bohrers

Mit Hilfe des Friedman-Tests konnte gezeigt werden, dass die Änderungen des Bohrerweights sowohl für den Bohrer von Hilti ( $\chi^2(2) = 32, p < .001, n = 16$ ) als auch für den Bohrer von Bosch ( $\chi^2(2) = 30, p < .001, n = 16$ ) statistisch signifikant waren. Die unbenutzten Bohrer von Hilti hatten im Median ein Gewicht von  $Mdn = 80.8$  g ( $IQA = 0.2$  g), nach 10.5 kumulativen Bohrmeter (CDM) im Median ein Gewicht von  $Mdn = 80.1$  g ( $IQA = 0.5$  g), und nach 21 CDM  $Mdn = 79.1$  g,  $IQA = 1$  g. Die Bohrer von Bosch hatten ein Anfangsgewicht von  $Mdn = 91.3$  g ( $IQA = 0.6$  g), wohingegen nach 10.5 CDM noch  $Mdn = 90.6$  g ( $IQA = 0.7$  g) und nach 21 CDM  $Mdn = 89.4$  g ( $IQA = 0.9$  g) vorlagen. Folglich reduzierte sich das Gewicht der Bohrer von Hilti im Median um 1.9 g und bei den Bohrern von Bosch im Median um 1.7 g. Wobei die Reduktion des Gewichtes bei beiden Bohrer-Modellen bei den zweiten 10.5 CDM größer war als bei den ersten (Differenz Bosch: 0.5 g, Hilti: 0.1 g).

#### 7.3.3.2 Verschleiß der Wendel

Eine vorangegangene Analyse (Shapiro-Wilk-Test) hatte gezeigt, dass für die Daten keine Normalverteilung angenommen werden konnte. Deshalb wurde für jeden Faktor ein Mann-Whitney-U-Test durchgeführt, um zu zeigen, ob die Vorschubkraft, die Querkraft, der Beton und der Hersteller einen Einfluss auf den Verschleiß der Wendel hatten. Zusätzlich wurde überprüft, ob der Bohrer an den verschiedenen Messpunkten unterschiedlich stark verschliss. Da die beiden Bohrerarten unterschiedliche Ausgangsdurchmesser hatten (Typ 0 bei 1: 9.54 mm, 2: 9.54 mm, 3: 9.53 mm und Typ 1 bei 1: 9.4 mm, 2: 9.39 mm, 3: 9.39 mm), wurden die relativen Durchmesseränderungen analysiert, um festzustellen, ob ein Faktor einen Einfluss hatte.

Am Messpunkt 1 (siehe Abbildung 7.6) führte eine *Querkraft* von 60 N nach 21 CDM zu einem höheren Wendelverschleiß ( $Mdn = 8.65$  mm) als 0 N ( $Mdn = 8.86$  mm), asymptotischer Mann-Whitney U-Test:  $z = 2.3000, p = .021$ . Die Effektstärke nach Cohen (1992) betrug  $r = .41$ . Dies entspricht einem starken Effekt. Für den Faktor *Vorschubkraft* konnte kein signifikanter Effekt nachgewiesen werden (170 N:  $Mdn = 8.68$  mm, 110 N:  $Mdn = 8.84$  mm, asymptotischer Mann-Whitney U-Test:  $z = 1.395, p = .163$ ). Auch für den Faktor *Hersteller* konnte keine Signifikanz festgestellt werden (asymptotischer Mann-Whitney U-Test:  $z = -1.885, p = .059$ ), während für den *Beton* ein deutlicher Unterschied zwischen C 20/25 ( $Mdn = 8.88$  mm) und C 50/60 ( $Mdn = 8.60$  mm) bestand (asymptotischer Mann-Whitney U-Test:  $z = 4.053, p = <.001, r = .72$ ) und damit ein starker Effekt. Generell war der Wendeldurchmesser nach 21 kumulierten Bohrmeter signifikant kleiner als im

Neuzustand (0 m:  $Mdn = 9.47$  mm, 21 m:  $Mdn = 8.75$  mm, asymptotischer Wilcoxon-Test:  $z = 4.937$ ,  $p < .001$ ,  $n = 32$ ). Die Effektstärke nach Cohen (1992) betrug  $r = .87$ , was einem starken Effekt entspricht.

Am Messpunkt 2 (siehe Abbildung 7.6), und damit 60 mm von der Bohrerspitze entfernt, bewirkte die höhere *Querkraft* (60 N:  $Mdn = 8.78$  mm) auch einen höheren Verschleiß (0 N:  $Mdn = 9.13$  mm). Der asymptotischer Mann-Whitney U-Test ergab:  $z = 4.451$ ,  $p < .001$ . Die Effektstärke nach Cohen (1992) betrug  $r = .79$ , was ebenfalls einem starken Effekt entspricht. Im Gegensatz zur *Querkraft* konnte für die anderen Faktoren *Vorschubkraft* (asymptotischer Mann-Whitney U-Test:  $z = 1.169$ ,  $p = .242$ ), *Hersteller* (asymptotischer Mann-Whitney U-Test:  $z = -1.924$ ,  $p = .34$ ) und *Betonfestigkeit* (asymptotischer Mann-Whitney U-Test:  $z = 1.528$ ,  $p = .127$ ) kein signifikanter Effekt nachgewiesen werden. Auch am Messpunkt 2 zeigte sich, dass der Wendeldurchmesser nach 21 kumulierten Bohrmeter signifikant kleiner wurde (0 m:  $Mdn = 9.47$  mm, 21 m:  $Mdn = 8.95$  mm, asymptotischer Wilcoxon-Test:  $z = 4.938$ ,  $p < .001$ ,  $n = 32$ ),  $r = .87$ , was einem starken Effekt entspricht.

An Messpunkt 3 (siehe Abbildung 7.6) konnte wie an Messpunkt 2 ein signifikanter Unterschied für die *Querkraft* festgestellt werden (60 N:  $Mdn = 9.12$  mm, 0 N:  $Mdn = 9.26$  mm, asymptotischer Mann-Whitney U-Test:  $z = 3.513$ ,  $p < .001$ ,  $r = .62$ ), was einem starken Effekt entspricht. Für den Faktor *Vorschubkraft* (asymptotischer Mann-Whitney U-Test:  $z = 0.302$ ,  $p = .78$ ) konnte kein Effekt festgestellt werden. Wohingegen für den Faktor *Hersteller* (asymptotischer Mann-Whitney U-Test:  $z = -2.682$ ,  $p = .007$ ) ein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden konnte (0:  $Mdn = 9.13$  mm, 1:  $Mdn = 9.20$  mm). Die Effektstärke nach Cohen betrug  $r = .47$  und entspricht einem mittleren Effekt. Bezüglich der *Betonfestigkeit* zeigte sich ein deutlicher Unterschied zwischen C 20/25 ( $Mdn = 9.26$  mm) und C 50/60 ( $Mdn = 9.16$  mm). Der asymptotische Mann-Whitney U-Test ergab:  $z = 2.096$ ,  $p = .036$ ,  $r = .37$ . Dies entspricht einem mittleren Effekt. Wie an den anderen Messpunkten ist der Wendeldurchmesser nach 21 kumulativen Bohrmeter signifikant kleiner gegenüber dem neuen Zustand (0 m:  $Mdn = 9.46$  mm, 21 m:  $Mdn = 9.19$  mm), asymptotischer Wilcoxon-Test:  $z = 4.941$ ,  $p < .001$ ,  $n = 32$ ). Die Effektstärke nach Cohen (1992) betrug  $r = .87$ , was einem starken Effekt entspricht.

Anhand der statistischen Analysen konnte gezeigt werden, dass die *Querkraft* an allen drei Messpunkten den größten Einfluss hatte. Als Ergebnis ist in Abbildung 7.6 der Verschleiß der Wendel an den einzelnen Messpunkten in Abhängigkeit von der *Querkraft* dargestellt.

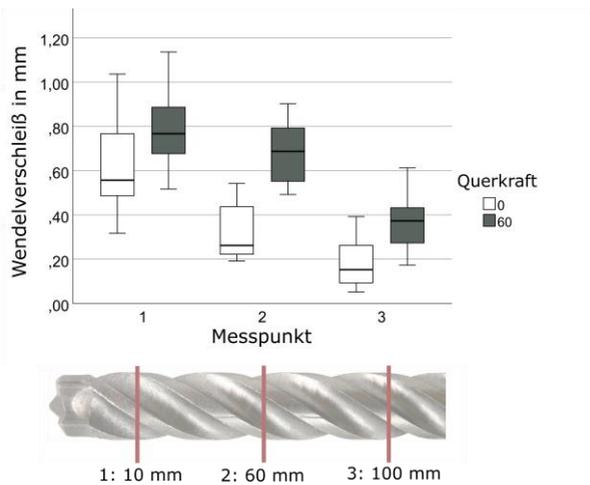
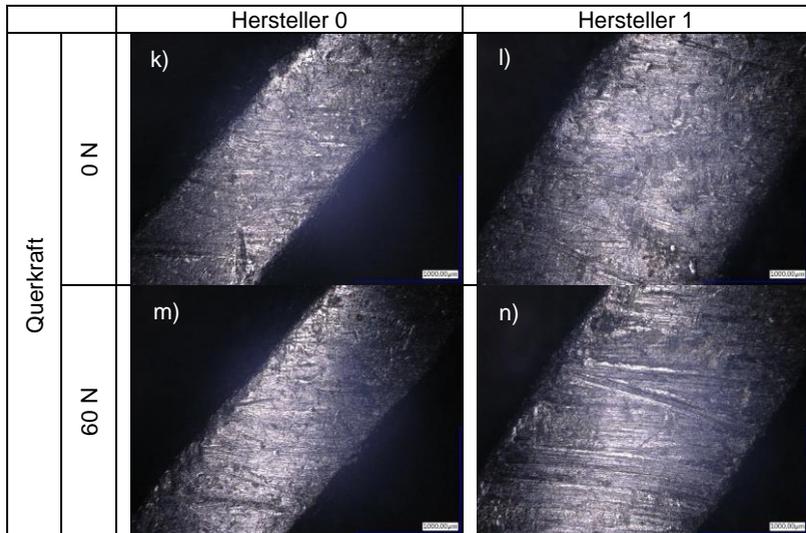


Abbildung 7.6: Differenz zwischen dem Ursprungsdurchmesser und dem Durchmesser der verschlissenen Wendel bei 32 Bohrern. Je Setup wurden zwei Bohrer ausgewertet. (Übersetzt von Uhl, Gauch et al., 2022)

Mit einer größeren *Querkräft* erhöhte sich bei allen untersuchten Bohrhämmer-Bohrer-Setups der Verschleiß der Wendel an allen drei beschriebenen Messpunkten. Dieser Einfluss der *Querkräft* auf den Verschleiß der Wendel war größer als der Einfluss der Faktoren *Vorschubkräft*, *Beton* und *Hersteller*. Der Unterschied im Median war an Messpunkt 2 am größten. Tabelle 7.4 zeigt Beispielbilder des Verschleißes an Messpunkt 1 für jede Hersteller und aufgebrauchte *Querkräft*. Wie zu sehen ist, sind deutliche Riefen durch die Nutzung aufgetreten und es scheint eine Tendenz zu geben, dass Riefen bei höheren Querkräften häufiger auftreten.

Tabelle 7.4: Exemplarischer Verschleiß an der Wendel des Bohrers 10 mm hinter der Bohrspitze (Messpunkt 1) für beide Hersteller.



### 7.3.3.3 Verschleiß der Bohrspitze

Zur Darstellung der zeitlichen Veränderungen bzw. des Verschleißes der sechs Messgrößen über die kumulierten Bohrmeter wurde der Friedman-Test verwendet. Untersucht wurde die Veränderung der absoluten Werte der Messgrößen. Die Ergebnisse sind in Anhang C Tabelle C.1: dargestellt.

Bei der Betrachtung der Außendurchmesser wird deutlich, dass sich beim *Hersteller 1* alle Außendurchmesser signifikant ändern und ein starker Effekt vorliegt. Beim *Hersteller 0* hingegen nimmt die Effektstärke von dem der Bohrspitze am nächsten gemessenen Durchmesser (D47) bis zum Durchmesser D05 ab. Signifikante Änderungen konnten auch für den Winkel *AN* nachgewiesen werden. Auffallend ist, dass die Winkeländerung für *Hersteller 0* (mittlere Effektstärke) positiv und für *Hersteller 1* (mittlere Effektstärke) negativ ist. Die Änderungen des Winkels *AC* sind ebenfalls für beide *Hersteller* signifikant. Für *Hersteller 0* konnte nur eine mittlere Effektstärke (0 vs. 21 CDM) und eine Abnahme der Effektstärke von den

ersten (mittlerer Effekt) 10.5 CDM zu den zweiten (kleiner Effekt) 10.5 CDM gezeigt werden. Für *Hersteller 1* konnte eine hohe Effektstärke über die gesamte CDM nachgewiesen werden. Für beide *Hersteller* wurde gezeigt, dass sich auch die Höhe der Bohrerspitze signifikant ändert. Nach Cohen (1992) konnte für *Hersteller 0* nur eine geringe Effektstärke von 0 bis 21 CDM nachgewiesen werden. Für *Hersteller 1* konnte hingegen ein mittlerer Effekt von 0 bis 21 CDM und ein kleiner Effekt von 10.5 bis 21 CDM festgestellt werden. Im Allgemeinen zeigen die Daten keinen starken Unterschied zwischen dem Effekt von 0 bis 10.5 CDM im Vergleich zum Effekt von 10.5 bis 21 CDM.

Um zu untersuchen, welcher Faktor einen Einfluss auf die relative Veränderung der Verschleißparameter hat, wurde der Mann-Whitney U-Test verwendet. Im Folgenden werden nur die Versuchsergebnisse dargestellt, die einen signifikanten Effekt ( $p < .05$ ) aufweisen. Da die Bohrerspitzen der beiden *Hersteller* unterschiedliche Geometrien aufweisen, wurde zunächst untersucht, ob dieser Faktor einen Einfluss auf den Verschleiß der Bohrerspitze hat ( $n = 32$ ). Es wurde festgestellt, dass der Faktor *Hersteller* einen starken Effekt auf den Verschleiß am Außendurchmesser *D05* hat ( $z = 4.185, p < .001, r = .74$ ). Der Unterschied im Außendurchmesser beträgt für den *Hersteller 0* im Median  $Mdn = 0.12$  mm, während dieser für den *Hersteller 1* im Median  $Mdn = 0.17$  mm beträgt. Ein starker Effekt auf die Variable *D47* ( $z = 3.430, p < .001, r = .61$ ; 0:  $Mdn = 1.82$  mm 1:  $Mdn = 2.48$  mm) konnte ebenfalls nachgewiesen werden. Auch für die beiden untersuchten Winkel *AN* ( $z = -4.824, p < .001, r = .85$  Median 0: 3.24 mm 1: -4.6 mm) und *AC* ( $z = 4.824, p < .001, r = .85$  Median 0: 8.12 mm 1: 18.23 mm), bei welchem ebenso ein starker Effekt nachgewiesen werden konnte. Obwohl sich die *Höhe* der Bohrerspitze bei beiden Bohrern nur geringfügig veränderte (0:  $Mdn = 0.04$  mm vs. 1:  $Mdn = 0.07$  mm), konnte ein starker Effekt ( $z = 2.846, p = .003, r = .50$ ) nachgewiesen werden.

Da der *Hersteller* einen Einfluss hat, wurden weitere Untersuchungen getrennt für die beiden Typen durchgeführt (jeweils  $n = 16$ ). Für *Hersteller 0* konnte gezeigt werden, dass die *Betonfestigkeit* einen starken Einfluss auf die beiden Außendurchmesser *D35* ( $U = 64.000, p < .001, r = .84$  Median C 20/25: 0.24 mm, C 50/60: 0.81 mm) und *D47* ( $U = 64.000, p < .001, r = .84, C 20/25: Mdn = 1.5$  mm C 50/60:  $Mdn = 2.19$  mm) hat. Ansonsten konnte für diesen *Hersteller* nur ein Einfluss der *Betonfestigkeit* auf die Variable *AC* ( $U = 60.000, p = .002, r = .74, C 20/25: Mdn = 6.08^\circ$  C 50/60:  $Mdn = 9.44^\circ$ ) nachgewiesen werden. Der Mann-Whitney-U-Test wurde anschließend auch für den *Hersteller 1* angewendet. Es zeigte sich, dass die *Betonfestigkeit* einen starken Effekt auf alle drei Außendurchmesser *D05* ( $U = 61.500, p = .001, r = .78$  Median 0: 0.12 mm 1: 0.25 mm), *D35* ( $U = 64.000, p < .001, r = .84$  Median 0: 0.45 mm 1: 0.74 mm), und

$D47$  ( $U = 57.000$ ,  $p = .007$ ,  $r = .66$  Median 0: 2.15 mm 1: 3.08 mm) hat. Bei diesem *Hersteller* wurde auch ein starker Effekt auf die beiden gemessenen Winkel  $AN$  ( $U = 2.000$ ,  $p = .001$ ,  $r = .79$  Median 0:  $-3.4^\circ$  1:  $-7.41^\circ$ ) und  $AC$  ( $U = 62.000$ ,  $p = .001$ ,  $r = .79$  Median 0:  $16.73^\circ$  1:  $19.24^\circ$ ) beobachtet. Der Einfluss der *Betonfestigkeit* in Interaktion mit dem *Hersteller* auf den Durchmesser  $D47$  ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Streuung bei *Hersteller* 1 deutlich höher war.

Hinsichtlich der Faktoren *Vorschubkraft* und *Querkraft* konnte für beide *Hersteller* kein signifikanter Einfluss auf eine abhängige Größe nachgewiesen werden.

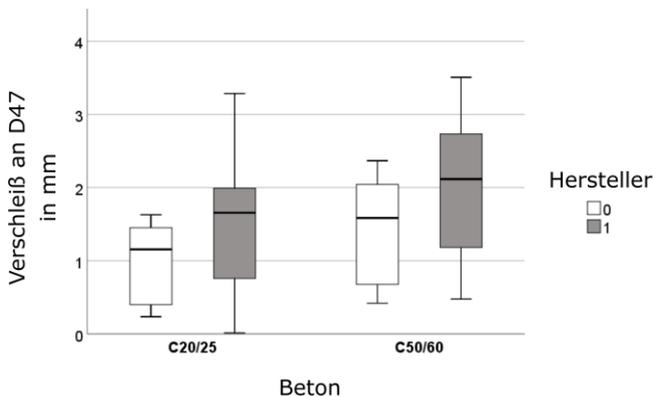


Abbildung 7.7: Änderung von  $D47$  in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit und der Hersteller. Boxplot-Whisker beinhalten  $IQA \cdot 1.5$  der Daten. (Übersetzt von Uhl, Gauch et al., 2022)

Zur visuellen Veranschaulichung der Ergebnisse sind in Tabelle 7.5 und Tabelle 7.6 beispielhafte Mikroskopbilder der Bohrerstippen dargestellt. Sie enthalten für jeden *Hersteller* ein Originalbild des Bohrers und für jede *Betonfestigkeit* je ein Bild nach 10.5 und nach 21 CDM.

Tabelle 7.5: Exemplarische Bilder der Bohrerspitzen im Grundzustand, nach 10.5 kumulierten Bohrmetern und nach 21 kumulierten Bohrmetern beider Hersteller in Beton C 50/60 gebohrt.

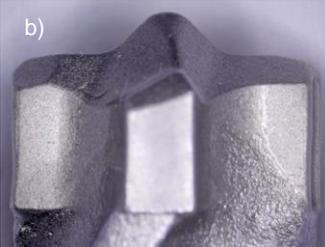
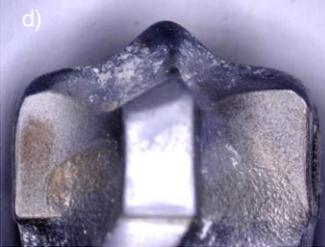
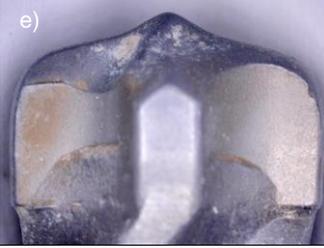
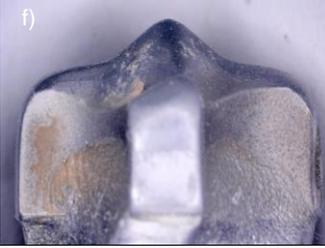
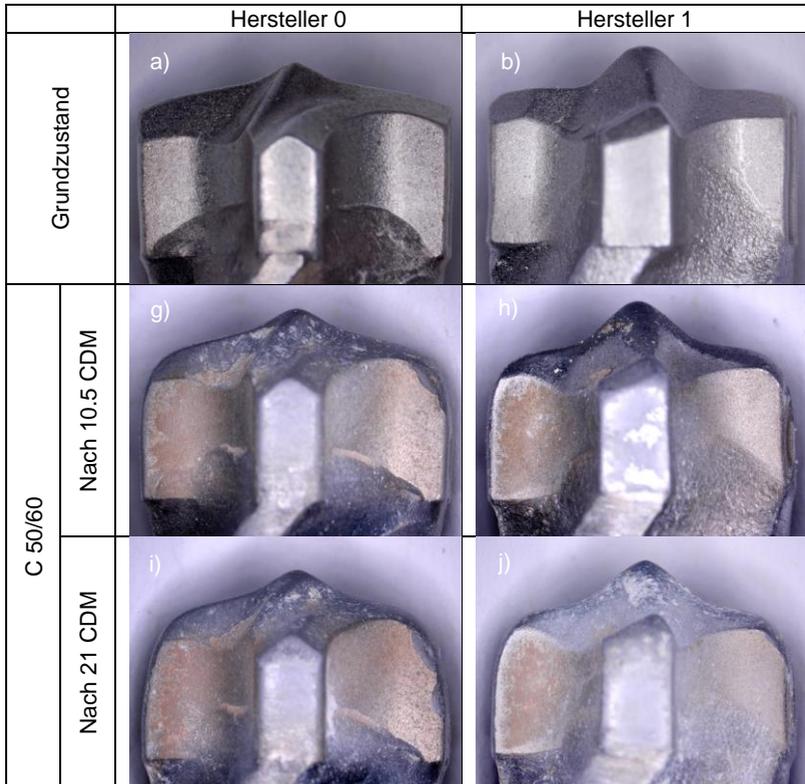
		Hersteller 0	Hersteller 1
C 20/25	Grundzustand	a) 	b) 
	Nach 10.5 CDM	c) 	d) 
	Nach 21 CDM	e) 	f) 

Tabelle 7.6: Exemplarische Bilder der Bohrspitzen im Grundzustand, nach 10.5 kumulierten Bohrm Metern und nach 21 kumulierten Bohrm Metern beider Hersteller in Beton C 50/60 gebohrt.



Die Originalbilder zeigen einen deutlichen Unterschied in den Bohrspitzengeometrien. Wird der zeitliche Einfluss auf die Bohrer berücksichtigt, so konnte eine Abrundung der Flanke beobachtet werden. Diese wird durch eine höhere Betonfestigkeit noch verstärkt. Diese Erkenntnisse sind auch auf die Zentrierspitze übertragbar. Die Zentrierspitzen verändern sich, wie bereits statistisch nachgewiesen, unterschiedlich. Bei *Hersteller 1* wurde die Spitze mit zunehmenden kumulierten Bohrm Metern spitzer, während sie bei *Hersteller 0* mit

zunehmenden kumulierten Bohrmetern stumpf wurde. Fast alle Bohrer zeigen Ausbrüche an den Ecken der Stirnseite und der Flanke. Auf beiden Stirnseiten sind kleinere Ausbrüche zu sehen, während sich größere Ausbrüche hauptsächlich auf der der Drehrichtung abgewandten Seite befinden. Die kleineren Ausbrüche an der Seite haben einen Durchmesser von etwa 66  $\mu\text{m}$  (siehe Abbildung 7.8), während größere Ausbrüche z. B. etwa 1910  $\mu\text{m}$  x 565  $\mu\text{m}$  (i) oder 886  $\mu\text{m}$  x 156  $\mu\text{m}$  (j) betragen können (Tabelle 7.6).

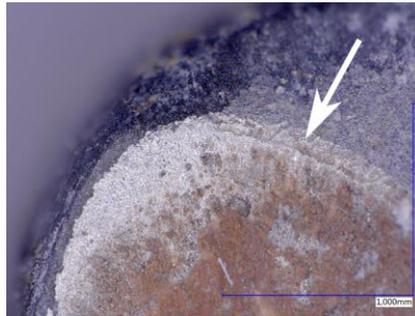
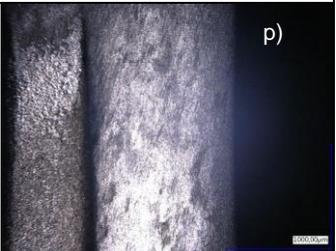
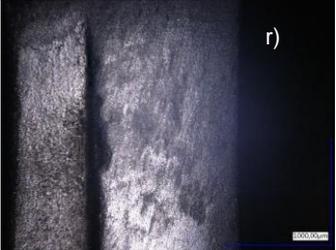


Abbildung 7.8: Vergrößerung des Bildes h) aus Tabelle 7.6 zur Veranschaulichung der Absplitterung entlang der Ecke zwischen Planfläche und Schneidkante.

In Tabelle 7.7 sind vier beispielhafte Bilder dargestellt. In den Bildern o), p) und r) treten Riefen auf, die von rechts oben nach links unten verlaufen. Dieser Verschleiß trat bei nahezu allen Bohrern auf. Ein Großteil der Bohrer des *Herstellers* 0 in Kombination mit höherfestem Beton, wiesen eine horizontale Riefenbildung knapp oberhalb der Kontrollverschleißkante auf. Beim Vergleich der beiden Hersteller fiel auf, dass Typ 1 deutlich mehr Kraterverschleiß aufwies, was durch den härteren Beton verstärkt wurde.

Tabelle 7.7: Exemplarischer Verschleiß am Außendurchmesser der Bohrerspitze. (Übersetzt von Uhl, Gauch et al., 2022)

		Hersteller 0	Hersteller 1
Betonfestigkeit	C 20/25	o) 	p) 
	C 50/60	q) 	r) 

## 7.4 Diskussion

Entsprechend dem Unterkapitel Ergebnisse, wird die Diskussion erneut für den Einfluss auf jede Bewertungsgröße getrennt durchgeführt. Hierfür werden zunächst die Ergebnisse der Produktivität und der Bohrhammervibration diskutiert. In den Versuchen wurde der Verschleiß nicht direkt eingestellt. Um dessen Einfluss trotzdem bewerten zu können, wurde dieser zusätzlich analysiert und nachfolgend diskutiert.

### 7.4.1 Produktivität

Die *Betonfestigkeit* und die *kumulierten Bohrmeter* bzw. der Bohrerverschleiß hatten den größten Einfluss auf die ROP. Diese Erkenntnisse stehen im Einklang mit den Ergebnissen von Cronjäger & Jahn (1985) und Kivade et al. (2015), die zeigten,

dass die ROP mit zunehmender Beton- bzw. Untergrundfestigkeit abnimmt. Weiterhin haben Untersuchungen von Antonucci et al. (2017), Botti et al. (2020) und Weinert et al. (1993) nachgewiesen, dass die ROP signifikant von den *kumulierten Bohrmetern* und dem daraus resultierenden Bohrer verschleiß abhängt. Bei der Betrachtung der verschlissenen Bohrer fielen mehrere Phänomene auf. Die Kanten verschliss entlang der Schneidkante. Dies führte zum einen zu einer größeren Kontaktfläche zwischen Bohrer und Beton bei gleichbleibender Schlagenergie und zum anderen wurde die Zentrierspitze flacher. Hieraus resultierte eine Verschlechterung der Rissbildung im Beton. Daher sollten diese beiden Effekte einen negativen Einfluss auf die ROP haben. Interessant ist, dass die Zentrierspitze des Bohrers vom Hersteller 0 abstumpfte, während der Bohrer vom Hersteller 1 durch die Benutzung schärfer wurde. Eine Begründung kann in dem Anfangszustand der Bohrerspitze gefunden werden. Beim Hersteller 1 ist diese zu Beginn sehr stumpf und beim Hersteller 0 spitz. Es konnte jedoch nicht beurteilt werden, ob dies einen positiven oder negativen Einfluss auf die ROP hat.

Der Einfluss der Faktorenkombination *Beton\*kumulierte Bohrmeter* zeigte, dass die ROP über die kumulierten Bohrmeter bei höherfestem Beton stärker abnahm. Dies konnte darauf zurückgeführt werden, dass die Bohrkopfseite bei höherer Betonfestigkeit schneller verschliss. Hierbei bildete sich eine Keilform aus. Diese war bei C 50/60 bereits nach 10.5 CDM stärker ausgeprägt als bei C 20/25 nach 21 CDM. Eine mögliche Erklärung kann anhand der Wellenausbreitung im Bohrer gefunden werden. Trifft die durch den Bohrer laufende Welle nicht senkrecht auf das Bohrende, sondern auf die Schräge der Keilform, wird die übertragene Energie stärker radial nach außen abgelenkt. Es kann somit angenommen werden, dass diese Keilform dazu führt, dass die Schlagenergie weniger fokussiert in den Beton übertragen werden kann. Zusätzlich kann es durch den Keil zwischen Bohrerspitze und Beton zu mehr Reibverlusten kommen. Der Verlauf der Kurven bei C 20/25, der sich zunehmend einer horizontalen Linie nähert, lässt sich auch dadurch erklären, dass zu Beginn (Botti et al., 2020) der Verschleiß an der Ecke der Schneidkante stärker ausgeprägt ist und sich dies bei C 20/25 im weiteren Verlauf geringfügiger ändert. Bei C 50/60 hingegen bildet sich die Keilform immer stärker aus. Dies könnte den fast linearen Verlauf der ROP erklären.

Weiterhin konnte in dieser Studie gezeigt werden, dass die *Querkraft* einen schwachen Effekt auf die ROP hatte. Dieses Ergebnis passt zu dem aus dem vorherigen Experiment. Der negative Einfluss könnte darauf zurückzuführen sein, dass durch die *Querkraft* mehr Reibung an der Bohrlochwand, aber auch auf Biegeschwingungen verursacht wurde und somit ein Teil der Schlagenergie verloren ging. Neben dem Haupteffekt der *Querkraft* konnte ebenso die Interaktion mit dem Verschleiß analysiert werden. Der grundsätzliche Verlauf des ROPs über die

kumulierten Bohrmeter schien unabhängig von der *Querkraft* zu sein. Interessant ist der Vergleich zwischen den Versuchen mit höherer *Vorschubkraft*. Je mehr der Bohrer verschliss, desto geringer wurde der Abstand zwischen der ROP mit und ohne *Querkraft*. Möglicherweise kann dies durch die Abnahme des Wendeldurchmessers bedingt sein.

Der Einfluss des *Herstellers* in Kombination mit der *Betonfestigkeit* zeigte, dass der Bohrer vom Hersteller 0 besser mit einer höheren Betonfestigkeit zurechtkam. Dies könnte an der Schneidkantengeometrie liegen, aber auch an einer besseren Bohrmehlabfuhr aufgrund der Wendelgeometrie. Im aktuellen Stand der Forschung sowie in der kausalen Studie I wurde gezeigt, dass die *Vorschubkraft* mit der ROP zusammenhängt (Botti et al., 2020; Cronjäger & Jahn, 1985; Uhl et al., 2019). Dies konnte in dieser Studie jedoch nicht nachgewiesen werden. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Anzahl der verglichenen Setups (16 mit 110 N und 16 mit 170 N *Vorschubkraft*) im Vergleich zur zufälligen Streuung zu gering war. Dies könnte auch erklären, warum sowohl der Faktor *Vorschubkraft* als auch in Kombinationen mit den drei anderen Faktoren (außer mit *Beton*) knapp unter oder an der Grenze für einen schwachen Effekt lagen. Anhand von Abbildung 7.3 kann für das Arbeiten mit einem Bohrhammer angenommen werden, dass ein neuer Bohrer zunächst zu einer höheren ROP führt. Je mehr sich der Bohrer jedoch abnutzt, desto produktiver ist es, eine geringere Andruckkraft aufzubringen (Kurven bei 14 m Schnittpunkt für C 50/60). Es ist zu vermuten, dass dies auch bei C 20/25 bei mehr als 21 kumulierten Bohrmeter der Fall sein könnte. Diese Hypothese muss jedoch in weiteren Untersuchungen bestätigt werden.

## 7.4.2 Vibration

Anhand der Schwingungen, die am Bohrhammer gemessen wurden, konnte eine Aussage über die Belastung des Anwenders getroffen werden. Die Schwingungen am Hauptgriff waren entscheidend für die Belastung des Anwenders und konnten aufgrund der Position des Sensors direkt mit anderen Untersuchungen, die nach DIN EN ISO 28927-10 (DIN EN ISO 28927-10) durchgeführt wurden, verglichen werden. Der Sensor am Gehäuse hingegen war nicht direkt mit der Norm vergleichbar. Wie die nachfolgende Verifikationsstudie zeigte, kann jedoch von der Gehäuseschwingung auf die Schwingungen am Seitengriff geschlossen werden. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die *Querkraft* von allen untersuchten Parametern den größten Einfluss auf den  $a_{hv}$ -Wert hatte. Die Erhöhung des  $a_{hv}$ -Wertes am Hauptgriff resultierte vermutlich aus der Schwingungsentkopplung des Griffs, da der Griff nicht für Querkräfte ausgelegt war. Der Bohrhammer besaß an der oberen Griffanbindung eine Biegefeder zur Schwingungsentkopplung, die den

Griff auch bei Querkräften von Schwingungen entkoppeln sollte. Am unteren Anschluss befand sich jedoch nur ein Drehgelenk, das in Querrichtung nicht entkoppelt war und daher beim Auftreten von Querkräften überbrückt wurde. Der Einfluss der *Querkräft* war größer als der Einfluss der *Betonfestigkeit*, welcher im Stand der Forschung bereits bekannt ist und bereits untersucht wurde. Die Abnahme der ROP durch Erhöhung der *Betonfestigkeit* war größer als der für vergleichbare *Betonfestigkeiten* bekannte prozentuale Einfluss von ca. 7 %. Jahn (1985) erklärte die grundsätzliche Abnahme damit, dass die mittlere Rückprallgeschwindigkeit des Bohrers bei weicherem *Beton* geringer ist. Dies führt zu einer kleineren Stoßzahl des Schlagkolbens, was ein stärkeres Ansaugen des Schlagkolbens durch den Antriebskolben zur Folge hat. Dies erhöht die Reibungskräfte der Schmierstoffe und die Maximalkraft der Luftfeder und führt somit zu größeren Schlagkräften bzw. Beschleunigungen des Gehäuses. Dieses Verhalten ist jedoch abhängig von den Massenverhältnissen der Schlagkomponenten und kann daher nicht verallgemeinert werden. Diese Zusammenhänge gelten nur für Bohrhämmer, bei denen der Schlagkolben eine größere Masse als der Zwischenkolben besitzt. Dies ist bei dem verwendeten Bohrhämmer der Fall und sollte daher übertragbar sein. Der Schwingungswert für das Gehäuse sinkt, während der für den Griff steigt. Dies stimmt mit den Ergebnissen aus der kausalen Studie I überein und wird durch die zusätzlich an das Gehäuse angekoppelte Masse begründet.

Die große Effektstärke des Faktors *Hersteller* könnte auf die Wendelgeometrie, das Gewicht oder die Schneidkanten geometrie des Bohrers zurückgeführt werden. Riederer (1985) stellte Gleichungen auf, bei denen die Bohrer masse, die Reibungskräfte zwischen Bohrer bzw. Zwischenkolben und Gehäuse sowie die Kraft zwischen dem Zwischenkolben und dem Dämpfungselement beeinflusste. Die Faktoren *kumulierte Bohrmeter* und *Vorschubkraft* hatten nur einen mittleren Einfluss auf die Hauptgriffschwingungen. Da die Bohrer kaum Gewicht verloren, dürfte der Einfluss der *kumulierten Bohrmeter* vor allem auf die Veränderung der Bohrer Spitze zurückzuführen sein. Diese Hypothese deckt sich mit den Erkenntnissen von Jahn (1985). Er zeigte, dass starker Verschleiß oder eine rundpolierte Bohrer Spitze die Schwingungswerte reduzieren. Jahn begründete dies damit, dass die Rückprallgeschwindigkeiten bei scharfen Bohrern höher sind, was zu kleineren Beschleunigungen im Gehäuse führt. Bei den untersuchten Bohrern mit einem Durchmesser von 25 mm war das Gewicht der scharfen und stumpfen Bohrer nahezu identisch. Eine weitere Erklärung hierfür könnte sein, dass eine scharfe Schneide tiefer in den Beton eindringt und somit die Energie effektiver überträgt. Weiterhin dürfte hier auch das Massenverhältnis von Schlagkolben zu Zwischenkolben eine Rolle spielen. Bei einem leichten Zwischenkolben trifft der Bohrer auf den Zwischenkolben, der dann die Energie an den Schlagkolben

zurückgibt. Der Rückprallimpuls wird durch die Luftfeder gestreckt und ist nicht so steil wie die Übertragung über das Dämpfungselement. Die Betrachtung des Einflusses der *Vorschubkraft* zeigte, dass in dieser Studie eine Erhöhung der *Vorschubkraft* zu einer Abnahme des  $a_{HV}$ -Wertes führte. Während dieser Befund mit Jahn (1985) übereinstimmt, stellten Uhl et al. (2019) ein gegenteiliges Verhalten des Bohrhammers fest. Die Ergebnisse der nachfolgenden Verifikationsstudie zeigen, dass das Verhalten stark bohrhammerspezifisch ist.

Bei den Faktorkombinationen sind diejenigen hervorzuheben, die einen mittleren Einfluss hatten. Die Kombination des *Betons* mit den *kumulierten Bohrmetern* und deren ausgeprägte Wirkung auf den  $a_{HV}$ -Wert lässt sich wiederum durch den stärkeren Verschleiß an der Seite des Bohrkopfes erklären. Durch die Keilform der Bohrerspitze verliert der Bohrer infolge der Reibung, die sowohl bei der Schlagbewegung als auch beim Rückprall auftritt, Energie. Dies führt dazu, dass der Bohrer zeitverzögert und mit geringerer Beschleunigung auf den Zwischenkolben des Bohrhammers trifft. Dies reduziert die Übertragung des Schlages auf das Bohrhammergehäuse. Die beiden weiteren Faktorkombinationen, die einen Einfluss hatten, sind die *Querkraft* in Wechselwirkung mit dem *Beton* und die *Querkraft* mit dem Faktor *Hersteller*. Bei der Wechselwirkung zwischen *Querkraft* und *Beton* kann eine mögliche Erklärung sein, dass durch die Biegesteifigkeit des Bohrerschafts bei härterem Betonmaterial andere Schwingungen entstehen oder dass bei weicherem Betonmaterial durch die Wendel ein ovaleres Bohrloch entsteht, was bedeutet, dass der Bohrer mehr Spiel in der Bohrung hat. Die Wechselwirkung der *Querkraft* mit dem *Hersteller* könnte dadurch vermutet werden, dass die Wendel, z.B. Schärfe der Wendelgänge, sich unterschieden. Die beiden Hersteller wählen neben der Geometrie auch ein unterschiedliches Fertigungsverfahren. Eine schärfere Kante könnte dazu führen, dass die Wendel weniger gut in der Bohrung gleitet und dadurch ein Schneidprozess stattfindet. Eine alternative Erklärung könnten die unterschiedlichen Biegesteifigkeiten der Bohrer sein. Eine weitere Erklärung für die Interaktionseffekte *Querkraft* und *Beton* sowie *Querkraft* und *Hersteller* könnte durch die Einschränkungen der möglichen Auswertung resultieren. Das Studiendesign erlaubt es nicht Interaktionseffekte 2. Ordnung zu betrachten. Wie in der Analyse des Verschleißes zu sehen ist, entstand beim Bohrer von Hilti eine stärkere Keilform als beim Bohrer von Bosch. Diese Keilform führte vermutlich dazu, dass sich der Bohrer im Eindringvorgang stärker im Bohrloch verkeilte und dadurch weniger stark zurückprallte. Dadurch kann erklärt werden, dass bei Beton C 50/60 und steigenden kumulierten Bohrmetern die Vibrationen abnahmen. Somit besteht vermutlich ein Interaktionseffekt aus *Querkraft*\**Betonfestigkeit*\**kumulierte Bohrmeter*. Dieser konnte jedoch aufgrund des Versuchsdesigns nicht belegt werden und birgt Forschungspotential für zukünftige Untersuchungen.

Beim Betrachten der  $a_{HV}$ -Werte am Gehäuse, ist zu erkennen, dass diese leicht über denen des Hauptgriffs lagen. Ebenso ist zu erkennen, dass die Effektstärken meist vergleichbar waren. Obwohl die *Querkraft* einen ähnlichen Effekt wie am Hauptgriff erzeugt, nahm der  $a_{HV}$ -Wert an dieser Messstelle ab. Der  $a_{HV}$ -Wert verhielt sich also bei Erhöhung der *Querkraft* konträr zu den Effekten am Hauptgriff und stimmte somit mit den Erkenntnissen aus der kausalen Studie I überein. Im Gegensatz zum Hauptgriff hatten hier die *Kombinationen* der Faktoren *Querkraft* mit *Beton* oder mit *Hersteller* keinen oder nur einen geringen Einfluss. Dass die *Vorschubkraft* als Faktor den zweitgrößten und in Kombination mit der *Querkraft* einen mittleren Einfluss hatte, ist auf die Schwingungsentkopplung des Hauptgriffs zurückzuführen. Der Zusammenhang, dass bei höherer *Vorschubkraft* die Schwingungen am Hauptgriff weniger stark abnehmen als am Gehäuse bzw. auf dem Gehäuse montierten Seitengriff, stimmt mit den Ergebnissen der Hauptstudie aus Kapitel 5.2 überein.

### 7.4.3 Verschleiß

Die Ergebnisse der Verschleißuntersuchung der Bohrerwendel zeigten, dass nur die *Querkraft* an allen Messpunkten einen signifikanten Einfluss auf den Wendelverschleiß hatte. Bei den Versuchsdurchläufen mit *Querkraft* führte der Roboter zwar eine horizontale Bewegung aus, da aber der Bohrhämmer über Elastomere mit dem Roboter verbunden war und der Bohrhämmer durch den Bohrer im Bohrloch eine feste Einspannung hatte, vollführte der Bohrhämmer durch das wirkende Moment zusätzlich eine seitliche Bewegung. Dadurch entstand ein sichelförmiger Kontakt zwischen der Bohrerwendel und dem Bohrloch. Diese Kontaktfläche verschob sich während des Bohrvorgangs entlang des Wendelschafts. Aufgrund dessen war die absolute Durchmesseränderung durch den Faktor *Querkraft* an allen Messpunkten annähernd gleich groß. Durch diesen Verschleiß verringerte sich die Tiefe der Wendelgänge, so dass weniger Bohrmehl abgeführt werden konnte. Dies könnte bei kleinen Durchmessern letztendlich zu einer Verstopfen der Bohrer führen, wodurch die Zuverlässigkeit der Bohrer sinkt (Hecker, 1983). Dies wiederum kann einen negativen Einfluss auf die ROP haben. Die Verschleißmuster der Wendelstege zeigten, dass durch die Rotation der Bohrer abrasiver Verschleiß auftrat. Dieser wurde durch die *Querkräfte* weiter verstärkt. Die exemplarischen Bilder bestätigten somit die Ergebnisse der statistischen Analyse. Auch wenn in dieser Studie kein Einfluss der Faktorenkombination *Querkraft\*Bohrmeter* nachgewiesen werden konnte, hatte der Faktor *Bohrmeter* einen starken Einfluss. Die Zuordnung des entstandenen Einflusses auf die Bohrer Spitze und die Wendel konnte jedoch anhand der Ergebnisse nicht vorgenommen werden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass der größte

Einfluss durch den Verschleiß an der Bohrerspitze verursacht wurde. Für die *Vorschubkraft* konnte hingegen an keinem der drei Messpunkte ein Einfluss nachgewiesen werden. Anhand der Medianunterschiede sowie dem ermittelten  $p$ -Wertunterschied kann jedoch angenommen werden, dass durch mehr Versuchswiederholungen ein gewisser Effekt nachgewiesen werden könnte.

An den Messpunkten 1 und 3 hatte die *Betonfestigkeit* einen signifikanten Einfluss auf den Verschleiß der Wendel. Das beim Bohren entstehende Bohrmehl wurde durch die Wendelgänge hinausgefördert. Vermutlich befindet sich das Bohrmehl ebenso zwischen dem Wendelsteg und der Bohrlochwand. Durch die Reibung zwischen der Wendel und dem härtesten Beton bzw. mit dessen Bohrstaub wurde der Verschleiß erhöht. Dieser Effekt konnte am mittleren Messpunkt nicht aufgezeigt werden. Am Messpunkt 1, und damit nahe der Bohrerspitze, konnte er deutlich stärker als am Messpunkt 3 nachgewiesen werden. Vermutlich ist dies darauf zurückzuführen, dass die Schäfte an diesen Messpunkten aufgrund der zunehmenden Bohrtiefe nicht so lange mit dem Bohrloch in Kontakt waren. Diese Hypothese passt zu den Ergebnissen aus Abbildung 7.6. Für den Faktor *Hersteller* konnte nur am Messpunkt 3 ein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. An den anderen Messpunkten lag der  $p$ -Wert unter .06. Es ist daher anzunehmen, dass bei mehr Testwiederholungen auch hier ein Einfluss hätte nachgewiesen werden können. Der Einfluss des Faktors könnte im Zusammenhang mit dem Bohrermaterial oder der Stegbreite stehen.

Der Hauptverschleiß an der Bohrerspitze wird durch Pitting bzw. Ermüdung an der Bohrerspitze und abrasiven Verschleiß durch die Kombination aus Schlag und Rotation an der Seite des Bohrers verursacht. Dieses Verhalten stimmt mit der Studie von Momeni et al. (Momeni et al., 2017) überein. Diese Hypothese wird durch die diagonale Riefenbildung bzw. den abrasiven Verschleiß an der abgerundeten Seite des Bohrers unterstützt. Die horizontalen Riefen, die vor allem an den sehr stark verschlissenen Bohrern (hauptsächlich C 50/60) auftraten, entstehen vermutlich dann, wenn die betroffene Fläche nicht mehr den aktuell größten Bohrerdurchmesser hat, aber nahezu senkrecht zur Schlagrichtung steht. Dadurch wird an dieser Stelle vermutlich kaum Schlagenergie in den Beton übertragen, so dass kein Zertrümmerungsvorgang stattfindet. Da der Bohrer das Bohrloch an dieser Stelle jedoch auf den größten Durchmesser ausweiten muss, kann dies nur durch Aufreiben mittels der Rotationsbewegung erfolgen. Hinsichtlich der beobachteten Einflussgrößen hat die Untersuchung gezeigt, dass kein Einfluss der Faktoren *Vorschub-* und *Querkraft* auf den Bohrer Verschleiß nachgewiesen werden konnte. Beim Vergleich der Ergebnisse mit denen des Wendelverschleißes, ist anzunehmen, dass dies auf das wesentlich härtere Material des Hartmetallkopfs zurückzuführen ist. Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse kann für zukünftige

Forschungsarbeiten sowie für Untersuchungen in der Industrie geschlossen werden, dass bei Verschleißanalysen von Bohrerköpfen die Vorschub- und Querkräfte nicht variiert werden müssen. Im derzeitigen Stand der Forschung gibt es keine Studien, die den Einfluss der Betonfestigkeit auf den Verschleiß von Hammerbohrern untersuchen. Anhand der hier durchgeführten Studie konnte gezeigt werden, dass durch einen härteren Beton der Durchmesser der Bohrerspitze schneller abnimmt. Untersuchungen von Botti et al. (2020), Carty et al. (2017) und Momeni et al. (2017) zeigen jedoch, dass es grundsätzlich die Bohrerecke ist, die am schnellsten verschleißt, was durch diese Untersuchung bestätigt wird. Der größte Verschleiß an dieser Stelle ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Kombination aus Schlag- und Reibungsbeanspruchung dort die größte Belastung für den Bohrer erzeugt. Diese Hypothese wird durch Untersuchungen von Antonov et al. (2015) gestützt, die das Verschleißverhalten von WC-Co-Hartmetallen mit und ohne Schlagbeanspruchung untersuchten. Aufgrund einer höheren Betonfestigkeit steigt diese Belastung an der Bohrerspitze weiter an. Wie die Beispielbilder zeigen, kommt es zu Ausbrüchen an den Ecken der Flanken. Die größeren Ausbrüche, die vor allem auf der von der Drehrichtung abgewandten Seite zu sehen sind, sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass in dieser Krafrichtung (entgegen der Drehrichtung) kein stützendes Material vorhanden ist. Dadurch kann Material einfacher abplatzen. Auch dieser Effekt ist bei C 50/60 stärker ausgeprägt.

Ein Vergleich des Faktors *Hersteller* zeigt, dass das Ergebnis der beiden Hersteller prinzipiell übertragbar ist, dass aber die Bohrerspitze des Herstellers 1 schneller verschleißt. Dennoch liegen beide Hersteller nach 21 kumulierten Bohrmeter bei C 20/25 noch im Zielbereich nach ETAG 001-1 (ETAG 001-1). Im Gegensatz zum Hersteller 0 liegt der Hersteller 1 bei den Versuchen mit C 50/60 knapp an der Grenze bzw. knapp darunter und wäre damit für diese Anwendung als verschlissen zu betrachten.

## 7.5 Zusammenfassung

Anhand der in diesem Kapitel durchgeführten Studie sollten insbesondere mögliche Interaktionseffekte von *Beton*, *Verschleiß*, *Hersteller*, und *Querkraft* auf die Bewertungsgrößen untersucht werden. Um die erforschten Ergebnisse besser interpretieren zu können, wurde zusätzlich der Bohrerverschleiß analysiert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die *Querkraft* den größten Einfluss auf den Verschleiß der Wendel hatte. Auf den Verschleiß an der Bohrerspitze konnte jedoch kein Einfluss der *Querkraft* nachgewiesen werden. Dieser konnte lediglich für die Faktoren *Beton* und *Hersteller* aufgezeigt werden. Es kann somit festgehalten

werden, dass in zukünftigen Verschleißanalysen der Wendel von Hammerbohrern die Querkraft berücksichtigt werden sollte.

Die Analyse der Vorschubgeschwindigkeit zeigte, dass die Haupteffekte der *Quer- und Vorschubkraft* sich mit den Ergebnissen aus dem vorherigen Experiment decken. Somit sollten bei der Untersuchung der Vorschubgeschwindigkeit insbesondere höhere Querkräfte aufgebracht werden, da diese einen mittelstarken Einfluss haben. Den größten Einfluss hatten der *Beton* sowie die *kumulierten Bohrmeter* und somit der Verschleiß des Bohrers. Die Interaktion der beiden Faktoren erzeugte ebenfalls eine Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit.

Bezüglich der Untersuchung der  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse und am Hauptgriff war der Einfluss der *Querkraft* an beiden Messpunkten am stärksten. Entsprechend den Ergebnissen aus der kausalen Studie I nahm mit der Erhöhung der *Querkraft* der  $a_{hv}$ -Wert am Gehäuse ab und am Hauptgriff zu. Diese Erkenntnisse sind einerseits für die Entwicklung und das Testing von Bohrhämmern und Bohrern wichtig, andererseits sollten diese in die zukünftigen Normen zur Bewertung der Schädigung des Anwenders durch Hand-Arm Vibrationen einfließen. In diesen Normen werden bislang Querkräfte überhaupt nicht berücksichtigt. Die Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass die von den Herstellern anzugebenden gerätespezifischen Schwingungswerte durch Querkräfte deutlich beeinflusst werden. Am Hauptgriff hatten der Faktor *Beton* den stärkeren und am Gehäuse die Vorschubkraft den zweitgrößten Einfluss. Im Gegensatz dazu konnte für die *kumulierten Bohrmeter* nur eine mittlere Effektstärke aufgezeigt werden. Neben den Haupteffekten wurden die Interaktionseffekte der Faktoren betrachtet. Hierbei konnte für die Kombinationen *Beton\* kumulierte Bohrmeter*, *Beton\*Querkraft* und *Vorschubkraft\*Querkraft* ein Einfluss mit mittlerer Effektstärke nachgewiesen werden.

Anhand der Analyse der Interaktionseffekte kann die Übertragbarkeit des Querkrafteinflusses auf die unterschiedlichen Hersteller bzw. Randbedingungen bewertet und somit ein Beitrag zur den Forschungsfragen 3 und 4 geliefert werden. Anhand des durchgeführten Experiments konnten zwar diverse Interaktionseffekte nachgewiesen werden, für die Beantwortung der Forschungsfrage sind jedoch lediglich diese entscheidend, welche die Querkraft als Kombinationsfaktor beinhalten. Aufgrund dessen sind nur die Kombinationen *Beton\*Querkraft* und *Vorschubkraft\*Querkraft* relevant, welche einen Einfluss auf die  $a_{hv}$ -Werte haben. Aus den Ergebnissen kann somit geschlossen werden, dass der Einfluss der Querkraft auf die  $a_{hv}$ -Werte nicht auf unterschiedliche Betonfestigkeiten sowie Vorschubkräfte übertragen werden kann. Somit sollte in der Entwicklung bzw. im Testing von Bohrern sowie Bohrhämmer eine Kombination aus der Querkraft und unterschiedlichen Betonfestigkeiten und Vorschubkräften berücksichtigt werden.

Die beschriebenen Hauptkenntnisse der beiden kausalen Studien, welche nicht bereits im Stand der Forschung bekannt waren, sind anhand von Erklärungsmodellen bzw. Ursache-Wirkungs-Diagrammen (siehe Abbildung 7.9) dargestellt. Diese beschreiben stark vereinfacht die Einflüsse der untersuchten Faktoren auf die Vorschubgeschwindigkeit und Bohrhammervibrationen sowie die vermutete Wirkungskette. Durch die Plus- und Minuszeichen werden lediglich Tendenzen des Einflusses visualisiert. Die genauen Zusammenhänge (linear / quadratisch) sind dem jeweiligen Kapitel zu entnehmen.

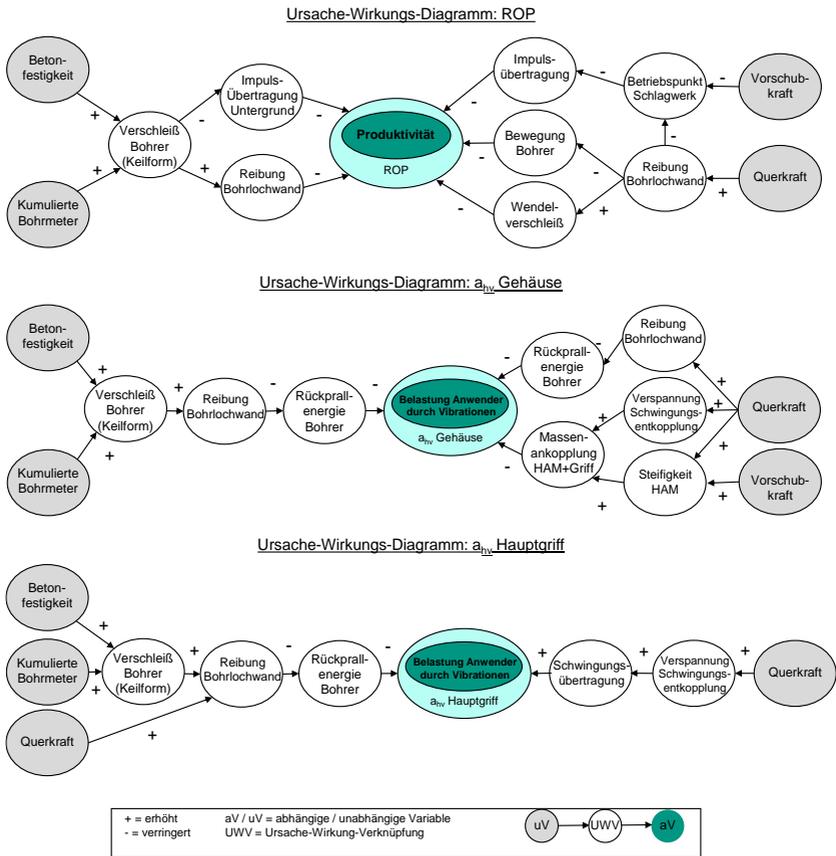


Abbildung 7.9: Zusammenfassung der Haupteigenschaften dieser Forschungsarbeit über den Einfluss der untersuchten Faktoren auf den  $a_{nv}$ -Wert und die ROP in Form von Ursache-Wirkungs-Diagrammen



## 8 Übertragbarkeit der Prüfstandergebnisse auf das manuelle Bohren (Verifikationsstudie)

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden zunächst die Höhe der bei professionellen Anwendern auftretenden Querkräfte beim Hammerbohren gemessen. Auf Basis der gemessenen Querkräfte wurde anschließend auf einem Prüfstand für den ermittelten Querkraftbereich analysiert, welchen Einfluss die Querkraft in Interaktion mit aus dem Stand der Forschung bekannten Einflussgrößen auf die Vorschubgeschwindigkeit und den  $a_{HV}$ -Wert hat. Der Prüfstand hatte hierbei den Vorteil, dass die Vorschubkraft und die Querkraft präziser und reproduzierbarer eingestellt werden konnte, als dies in einem Experiment mit Probanden und manuellem Hammerbohren möglich wäre. Gleichzeitig werden die Schwingungseigenschaften und die Greifkraft durch das Hand-Arm Modell über alle Versuche hinweg konstant gehalten.

Die vorangegangenen Studien haben gezeigt, dass die Querkraft sowohl die Vorschubgeschwindigkeit als auch die  $a_{HV}$ -Werte beeinflusst. Weiterhin konnte bewiesen werden, dass die erforschten Zusammenhänge vom technischen System sowie der Vorschubkraft und der Betonfestigkeit abhängen.

Die Gültigkeit des verwendeten Hand-Arm Modells wurde bislang jedoch nur für einen Bohrhammer und nur für Kräfte in Vorschubrichtung nachgewiesen (Cronjäger et al., 1984). Wie im Forschungsdesign (siehe Abbildung 4.1) dargelegt wird in einer abschließenden Studie deshalb die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf das manuelle Hammerbohren verifiziert. Hierfür werden die am Prüfstand erzeugten Ergebnisse mit Versuchen verglichen, bei denen manuell gebohrt und die Querkraft gezielt eingestellt wurde.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können Anforderungen an zukünftige Versuchsumgebungen abgeleitet werden. Dadurch ist es möglich, die gleiche Belastung auf Prüfständen wie beim manuellen Hammerbohren abzubilden.

*Das methodische Vorgehen, die Ergebnisse und die Diskussion der Verifikationsstudie bezüglich der Bewertungsgröße Bohrhammervibrationen dieses Kapitels basieren auf der Veröffentlichung:*

*„Factors on Vibrational Harm during Hammer Drilling – Influences of Lateral Force, Feed Force, Hammer Drill and Drill Bit Type”, (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2022 eingereicht bei Journal of Applied Ergonomics)*

*Die Ergebnisse und die Diskussion der verifikationsstudie bezüglich der Bewertungsgröße Produktivität dieses Kapitels basieren auf der Veröffentlichung:*

*„Does the User Behavior effect the Productivity of Hammer Drilling? – Analysis of the Influences of Feed and Lateral Force”, (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2022 eingereicht bei Journal of Applied Ergonomics)*

*Abbildungen und Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus den beiden Veröffentlichungen übernommen. Im Gegensatz zu den Abbildungen werden die Texte aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.*

## **8.1 Fragestellungen**

Auf Basis dieser Studie sollen die folgenden Forschungsfragen beantwortet werden:

*FF 5: In welchem Maße können die Erkenntnisse aus den durchgeführten kausalen Studien mit prüfstandbasierten Versuchen auf das manuelle Hammerbohren übertragen werden?*

*FF 6: Welche Erkenntnisse können anhand der gewonnenen Ergebnisse für die Anforderung von zukünftigen Versuchsumgebungen zur Analyse des Einflusses der Querkraft auf den Hammerbohrprozess abgeleitet werden?*

Um die Forschungsfrage 5 beantworten zu können, wird ein Experiment mit manuellem Hammerbohren durchgeführt. Im Gegensatz zur explorativen Studie (Kapitel 5.2) wurden den Probanden definierte Querkräfte vorgegeben. Die aus dem Experiment gewonnenen Ergebnisse wurden einerseits mit den Daten der Hauptstudie aus der explorativen Studie sowie andererseits mit den prüfstandbasierten Daten der kausalen Studie verglichen.

Für ein besseres Verständnis, ob auf dem Prüfstand die gleiche Belastung auf den Bohrer erzeugt wurde wie beim manuellen Hammerbohren, findet zusätzlich eine theoretische Betrachtung des am Prüfstand existierenden Belastung bzw. Kräftesystems statt (Kapitel 8.5). Neben möglichen Erklärungen für Unterschiede in den Ergebnissen der jeweiligen Experimente können durch diese Analyse Anforderungen an zukünftige Prüfstände und insbesondere an HAM abgeleitet werden (Forschungsfrage 6).

## 8.2 Methodisches Vorgehen

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird zunächst der Versuchsaufbau und die Probanden des Experiments beschrieben. Anschließend wird der Versuchsablauf sowie die Datenauswertung dargelegt.

### 8.2.1 Versuchsaufbau

Bohrhammer, Bohrer und Messtechnik wurden in dieser Studie identisch zu den bisherigen Studien gewählt. Dadurch war es möglich, die Ergebnisse aller Studien miteinander vergleichen zu können. Es wurde ein Bohrhammer von Bosch (Modell GBH 3-28 DRE, Robert Bosch Power Tools GmbH, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland) sowie ein Bohrer von Hilti (Typ TE-CX (SDS plus), Hilti AG, Schaan, Liechtenstein) mit vier Schneidkanten, einem Durchmesser von 10 mm und einer Arbeitslänge von 150 mm gewählt. Als Betonprobe (siehe Abbildung 8.1 Punkt 2) wurde erneut C 20/25 (Betonprüfkörper C 20/25, Rau-Betonfertigteile, Ebhausen, Deutschland) genutzt. Die Probe hatte die Abmaße 2400 mm x 2000 mm x 200 mm. Sie enthielt in einem Abstand von 150 mm Bewehrungsseisen mit einem Durchmesser von 6 mm. Zur Messung der Vorschub- und Querkräfte wurde eine Kraftmessplatte (1) (Typ AMTI Modell BP600900-1000, AMTI, Watertown (MA), USA) und zur Messung des Stroms eine Strommesszange (Modell i310s, Fluke Corporation, Everett (Washington), USA) eingesetzt. Um die Messergebnisse sowohl mit den manuellen Ergebnissen als auch mit den automatisierten Versuchen vergleichen zu können, wurden drei Beschleunigungssensoren (4) (Modell PCB 356A02, PCB Piezotronics, Depew (NY), USA) verwendet. Diese wurden am Haupt- und Seitengriff sowie am Gehäuse angebracht. Ein Bildschirm (3) diente zur Anzeige von Soll- und Ist-Werten der Vorschub- und Querkraft. Mit einer Absauganlage wurde der Umgebungsstaub abgesaugt.

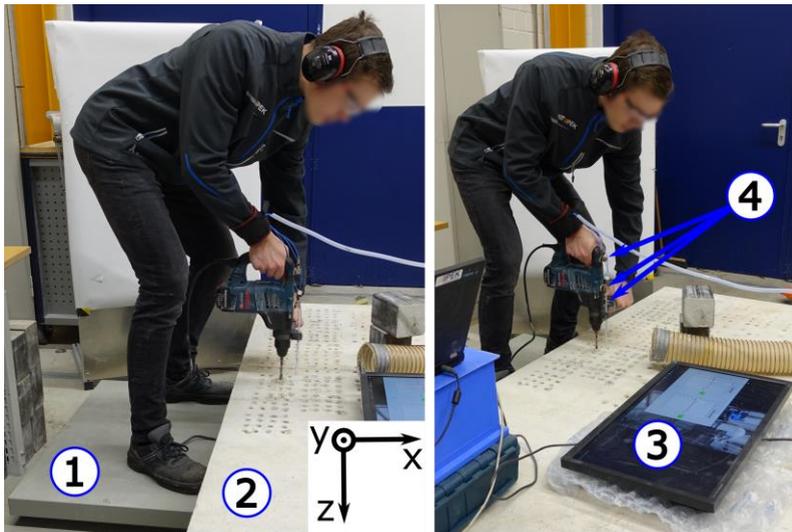


Abbildung 8.1: Versuchsaufbau zum vertikalen nach unten Bohren mit Probanden in der Verifikationsstudie. In den beiden Bildern sind die Kraftmessplatte (1), Betonprobe aus C 20/25 (2), Display für das visuelle Feedback (3) sowie die drei Beschleunigungssensoren (4) am Haupt-, Seitengriff und Gehäuse zu sehen.

## 8.2.2 Probanden

An der Studie nahmen drei männliche Probanden aus dem wissenschaftlichen Umfeld teil. Alle Teilnehmer wurden hinsichtlich ihrer Rechte als Versuchspersonen aufgeklärt und haben ein vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) genehmigtes Einwilligungsverfahren unterschrieben. Die Probanden waren zwischen 25 und 32 Jahre alt und gaben an, geübt im Umgang mit Bohrhämmern zu sein. Weitere Probandendaten sind in der Tabelle 8.1 festgehalten.

Tabelle 8.1: Alter und anthropometrische Daten der Probanden

Merkmal	Probanden
	1 / 2 / 3
Alter [Jahre]	25 / 28 / 33
Gewicht [kg]	85 / 105 / 75
Körpergröße [mm]	1870 / 1900 / 1910
Geschlecht (w / m)	m / m / m
Händigkeit (links / rechts)	rechts / rechts / rechts

### 8.2.3 Versuchsablauf

In der Verifikationsstudie wurden für die Querkraft die Extremwerte (0 N und 60 N) aus der prüfstandbasierten Studie vorgegeben. Für die Vorschubkraft wurden die Faktorstufen 110 N und 170 N gewählt, da diese in beiden prüfstandbasierten Studien eingestellt worden sind. Jeder Proband führte einen vollfaktoriellen, randomisierten Versuchsplan mit neun Versuchswiederholungen (40 Versuche je Proband) durch. Bei den Versuchen wurde darauf geachtet, dass es zu keinen Bewehrungstreffern und nicht zum Verstopfen des Bohrers bzw. Puffungen kam. Während des Bohrens durfte der Bohrer nicht zum Entlüften aus dem Bohrloch gezogen werden. Dadurch konnten die Werte der ROP untereinander und mit dem automatisierten Hammerbohren verglichen werden. Jedes Bohrloch wurde vor der Versuchsreihe mit einem separaten Bohrer auf eine Tiefe von 55 mm vorgebohrt. Hierbei wurden keine Querkräfte aufgebracht, um ein senkrechtes Bohrloch zu erzeugen. Bei den eigentlichen Versuchen wurden die entsprechenden Faktoreinstellungen von Beginn an aufgebracht. Der Proband sollte weitere 80 mm bohren, sodass eine Gesamttiefe von 135 mm erreicht wurde. Das Erreichen der Gesamtbohrtiefe wurde durch einen Endanschlag am Bohrhammer definiert.

Die gemessene Vorschub- und Querkraft wurden dem Probanden anhand eines Balkendiagramms auf einem Bildschirm angezeigt. Damit der Proband sich nur auf zwei Wertvorgaben konzentrieren musste, wurden die beiden Querkräfte (x- und y-Richtung) miteinander verrechnet und lediglich der Betrag angezeigt. Dem

Probanden wurde vorgegeben, dass eine Querkraft von 60 N in die y-Richtung (siehe Abbildung 8.2 *Setup 1*) bzw. in die negative x-Richtung (siehe Abbildung 8.2 *Setup 2*) aufgebracht werden sollte.

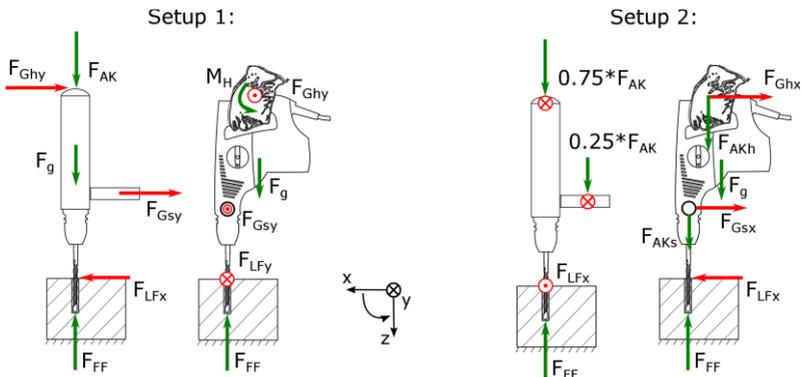


Abbildung 8.2: Schematische Darstellung der Belastungen bei den beiden manuellen Versuchssetups der Verifikationsstudie. Kräfte und Moment zur Erzeugung der Vorschubkraft sind in grün und Kräfte zur Erzeugung der Querkraft in rot dargestellt.

In Kapitel 5.1.4 wurde aufgezeigt, dass der Anwender durch aufbringen einer zur Bohrerachse exzentrischen Andruckkraft immer Querkräfte generiert. Auf dem Prüfstand konnte jedoch ein querkraftfreies Hammerbohren realisiert werden. Aufgrund dessen wurde in der Verifikationsstudie bei Versuchen mit einer Querkraftvorgabe von 0 N zwei unterschiedliche Vorgaben gewählt. Im *Setup 1* (siehe Abbildung 8.2 links) sollten die Probanden bei Versuchen ohne Querkraft ein Moment über die Hand am Hauptgriff aufbringen, um dadurch eine Vorschubkraft zu erzeugen, welche in der Bohrerachse wirkt. Somit konnte ein nahezu querkraftfreies manuelles Hammerbohren ermöglicht werden. Die wirkende Andruckkraft ist somit vergleichbar zum Prüfstand. Im *Setup 2* (siehe Abbildung 8.2 rechts) bohrten die Probanden bei Versuchen mit einer Querkraftvorgabe von 0 N ohne ein visuelles Feedback der Querkraft. Hierbei musste lediglich die Vorschubkraft korrekt eingestellt werden. Dies hatte den Vorteil, dass die Probanden realitätsnäher bohren konnten. Die Greifkräfte wurden in allen Versuchen nicht gemessen bzw. vorgegeben, um den Probanden nicht zu überfordern.

## 8.2.4 Datenauswertung

Die Datensätze wurden mit MATLAB (R2017b, MathWorks, Natick (Massachusetts), USA) verarbeitet. Entsprechend dem Vorgehen aus der Hauptstudie der explorativen Studie wurden die Rohdaten auf den relevanten Zeitraum, in dem der Bohrvorgang durchgeführt wurde, zugeschnitten. Anschließend wurden aus dem zeitlichen Verlauf der gemessenen Signale charakteristische Werte ermittelt. Für den Vergleich wurden die Mediane der einzelnen abhängigen Variablen für die unterschiedlichen Vorschubkraft-Querkraft-Kombinationen berechnet. Im Kapitel *Ergebnisse* wurden Mittelwerte ( $M$ ), Median ( $Mdn$ ), Standardabweichung ( $SD$ ) und Interquartilsabstand ( $IQA$ ) angegeben. P-Werte  $< .05$  wurden als signifikant angesehen.

## 8.3 Ergebnisse der Verifikationsstudie

Für einen Vergleich der Studien mit dem Prüfstand gegenüber denen mit manuellem Hammerbohren sind in Tabelle 8.2 und Tabelle 8.3 die Ergebnisse der durchgeführten Experimente zusammengefasst. Dieser Vergleich soll als Grundlage für die Verifikation dienen. Neben dem Median der einzelnen Versuchssetups wurde jeweils die prozentuale Änderung gegenüber der Grundbelastung ( $FF = 110 \text{ N} / LF = 0 \text{ N}$  bzw.  $FF = 100 \text{ N}$  (explorative Studie)) dargestellt. Die wichtigsten Ergebnisse aus der Tabelle werden nachfolgend zunächst beschrieben und in Kapitel 8.4 diskutiert.

### Schlagfrequenz

Bei der Betrachtung der Schlagfrequenz war zu erkennen, dass durch eine Erhöhung der Vorschubkraft die Schlagfrequenz bei allen Versuchen um ca. 2 – 3 Hz abnahm. Werden die Versuche mit einer Querkraft betrachtet, fällt auf, dass die relativen Änderungen der prüfstandbasierten Studie und des Setups 1 der Verifikationsstudie etwa 2 – 4 % betragen. Beim Setup 2 der Verifikationsstudie trat ein deutlich stärkerer Abfall auf.

### ROP

Ein geringer Anstieg der ROP aufgrund einer Erhöhung der Vorschubkraft war bei den professionellen Anwendern aus der explorativen Studie und auf dem Prüfstand (kausale Studie) zu erkennen. In der Verifikationsstudie blieb dieser konstant bzw. verringerte sich geringfügig. Der Vergleich der Setups 1 und 2 der Verifikationsstudie ohne Querkräfte zeigte, dass durch eine nahezu querkraftfreie

bzw. momentenfreie Aufbringung der Vorschubkraft eine 13 % höherer ROP (Setup 1: 8,9 mm/s; Setup 2: 7,88 mm/s) erreicht wurde. Weiter zeigen die Ergebnisse, dass bei allen Versuchen eine Querkraft zur einer Erniedrigung der ROP führte. Insbesondere die Änderungen von Setup 1 der Verifikationsstudie stimmten relativ gut mit denen der prüfstandbasierten Versuche überein.

Tabelle 8.2: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Vorschubgeschwindigkeit (ROP) und der Schlagfrequenz ( $f_s$ ) der durchgeführten Studien zur Verifikation der mittels des Prüfstands gewonnenen Erkenntnisse

	VK	ROP in mm/s (in %)		$f_s$ in Hz (in %)	
		0	60	0	60
<b>QK</b>		0	60	0	60
Exporative Studie (n= 59)	100	7.05 (100)	-	67.6 (100)	-
	150	7.32 (104) →	-	67.0 (99) →	-
	200	7.28 (103) →	-	65.8 (97) →	-
Kausale Studie (n= 120)	110	8.85 (100)	8.65 (98) →	67.3 (100)	66.0 (98) →
	170	9.03 (102) →	8.4 (95) →	65.8 (97) →	64.1 (95) →
Verifikation Versuch 1 (n= 120)	110	8.9 (100)	8.66 (97) →	67.6 (100)	66.6 (98) →
	170	8.82 (99) →	8.04 (90) ↓	66.2 (98) →	65.1 (96) →
Verifikation Versuch 2 (n= 120)	110	7.88 (100)	6.7 (85) ↓	66.6 (100)	60.9 (91) ↓
	170	7.79 (99) →	7.02 (89) ↓	64.9 (98) →	60.7 (91) ↓

Tabelle 8.3: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Bohrhammervibrationen am Hauptgriff (ahv H), Gehäuse (ahv G) und Seitengriff (ahv S) der durchgeführten Studien zur Verifikation der mittels des Prüfstands gewonnenen Erkenntnisse

VK		ahv H in m <sup>2</sup> /s (in %)		ahv G in m <sup>2</sup> /s (in %)		ahv S in m <sup>2</sup> /s (in %)	
QK		0	60	0	60	0	60
Exporative Studie (n= 59)	100	16.7 (100)	-	18.9 (100)	-	-	-
	150	16.2 (97) →	-	17.4 (92)	-	-	-
	200	12.9 (77) ↓	-	12.3 (65)	-	-	-
Kausale Studie (n= 120)	110	14.1 (100)	17.3 (123) ↑	20.4 (100)	16.4 (81) ↓	-	-
	170	12.1 (86) ↓	17.9 (127) ↑	18.0 (88) ↓	14.7 (72) ↓	-	-
Verifikation Setup 1 (n= 120)	110	17.1 (100)	19.8 (116) ↑	25.0 (100)	23.3 (93) →	21.4 (100)	18.9 (88) ↓
	170	20.4 (119) ↑	17.6 (103) →	23.7 (94) →	17.3 (69) ↓	19.4 (91) →	13.7 (64) ↓
Verifikation Setup 2 (n= 120)	110	16.4 (100)	10.0 (61) ↓	25.9 (100)	14.1 (54) ↓	21.4 (100)	12.7 (59) ↓
	170	15.0 (91) ↓	10.6 (64) ↓	18.2 (70) ↓	12.6 (48) ↓	15.8 (74) ↓	10.9 (51) ↓

### ahv-Werte

Sowohl am Hauptgriff als auch am Gehäuse verringerte sich der ahv-Wert durch eine Erhöhung der Vorschubkraft bei nahezu allen Studien um bis zu 30 %. Lediglich beim Setup 1 der Verifikationsstudie stieg der Wert um 19 % an. Die Betrachtung der Absolutwerte des ahv-Wertes ohne Querkraft zeigte, dass die Werte der prüfstandbasierten Studie etwas niedriger waren als die der manuellen

Versuche. Durch Aufbringung einer Querkraft fielen die  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse bei allen Studien ab. Am Hauptgriff stimmten die Ergebnisse der prüfstandbasierten Versuche nicht mit allen manuellen Versuchen überein. Lediglich bei Setup 1 der Verifikationsstudie stieg der  $a_{hv}$ -Wert ebenfalls an. Die Vergleiche der  $a_{hv}$ -Werte am Seitengriff zum Gehäuse zeigten, dass die Absolutwerte am Seitengriff niedriger waren, jedoch die relativen Änderungen aufgrund der Variation der Vorschub- und Querkraft relativ gut übereinstimmten.

## 8.4 Diskussion der Ergebnisse der Verifikationsstudie

### Vergleich der Schlagfrequenz

Beim Setup 1 und Setup 2 der Verifikationsstudie wurden die gleichen Gesamtkräfte wie in den beiden vorangegangenen Studien aufgebracht. Es stellt sich jedoch die Frage, ob diese über die gleichen Angriffspunkte am Bohrerhammer eingeleitet wurden. Erst dies erlaubt die Annahme, dass ein vergleichbarer Belastungszustand vorliegt. Anhand der Drehzahl kann die Belastung am Bohrer durch Reibung bewertet werden. Aufgrund dessen wurde diese in allen Studien bestimmt. Die in der Tabelle 8.2 zusammengefassten Ergebnisse machen deutlich, dass bei Versuchen ohne Querkräfte die Schlagfrequenzen aller Versuche recht gut vergleichbar sind. Insbesondere wenn die relativen Änderungen der Frequenzen miteinander verglichen werden.

Wurde in den Versuchen eine Querkraft aufgebracht, verringerte sich der Median der Schlagfrequenz in allen Studien und stimmt somit mit der Korrelationsanalyse aus Kapitel 5.2.3.2 überein. Beim Vergleich der prüfstandbasierten Ergebnisse der Schlagfrequenz mit denen aus der Verifikationsstudie wird deutlich, dass die Bohrerbelastung im Setup 2 deutlich zu hoch war. Beim Setup 1 wie auch in der prüfstandbasierten Studie sank die Frequenz um 2 % gegenüber den Versuchen ohne Querkräfte ab. Dies lässt vermuten, dass die Belastung des Bohrers in der prüfstandbasierten Studie sehr gut mit der beim Setup 1 vergleichbar war.

Anhand der Analyse der Schlagfrequenz konnte gezeigt werden, dass die Belastung am Bohrer nicht von der Kraftrichtung abhing. Die in der automatisierten Versuchsumgebung abgebildete Belastung entsprach weitgehend dem Setup 1 der Verifikationsstudie. Eine Übertragung der Erkenntnisse bezüglich der Schlagfrequenz auf das manuelle Hammerbohren ist somit sehr gut möglich.

## **Vergleich der ROP**

Der Vergleich des Einflusses der Quer- und Vorschubkraft auf die ROP stimmte bei  $VK = 110 \text{ N}$  bei der prüfstandbasierten Studie sehr gut mit dem Setup 1 der Verifikationsstudie überein. Die Werte bei  $VK = 170 \text{ N}$  waren beim Vergleich dieser Studien beim manuellen Bohren minimal niedriger, stimmten jedoch immer noch sehr gut überein. Der geringfügige Unterschied könnte eine zufällige Streuung sein. Vermutlich entstand dies jedoch dadurch, dass es den Probanden bei höherer Vorschubkraft schwerer fiel, ein Moment durch die Hand aufzubringen, ohne dass hierbei Querkräfte wirkten. Durch ein freies Arbeiten (Setup 2) fielen die Werte um etwa  $1 \text{ mm/s}$  ab. Wie im Kapitel 5.1.4 bereits dargestellt, brachte der Anwender hierbei eine Kraft exzentrisch zur Bohrachse auf. Hierdurch entstand ein Moment, welches die Reibung am Bohrloch erhöhte und dadurch die Drehzahl des Bohrhammers verringerte.

Im Vergleich der Ergebnisse des Prüfstands zu den Absolutwerten der explorativen Studie wird deutlich, dass diese etwas niedriger waren. Dies kann durch die härtere Betonfestigkeit sowie den Bohrerzustand erklärt werden. Mit den dort verwendeten Bohrern wurden mehr Bohrungen durchgeführt, wodurch diese stärker verschlissen waren. In den Daten ist jedoch ein Anstieg und eine anschließende Stagnation der ROP zu erahnen. Dieser Trend passt zu den Ergebnissen der prüfstandbasierten Studie. Der negative Einfluss der Querkraft auf die ROP stimmte auch mit den untersuchten Korrelationen aus der explorativen (siehe 5.2.3.2) überein.

Die Erkenntnisse des Prüfstands bezogen auf die ROP können auf das manuelle Hammerbohren grundsätzlich sehr gut übertragen werden. Die Andruckkraft scheint jedoch so aufgebracht worden zu sein, dass diese nahezu in der Bohrerachse lag und deshalb die ROP gegenüber dem realen manuellen Bohren um etwa  $10 \%$  hoch war.

## **Vergleich der $a_{hv}$ -Werte am Hauptgriff**

Wurde die Vorschubkraft in den Experimenten erhöht, sank der  $a_{hv}$ -Wert ab. Lediglich beim Setup 1 der Verifikationsstudie nahm dieser zu. Dies könnte damit erklärt werden, dass durch das aufgebrachte Moment der Hand am Hauptgriff, diese nicht voll auflag. Dadurch sind auch die höheren Werte bei einer Vorschubkraft von  $110 \text{ N}$  erklärbar. Die Ergebnisse des Setups 2 der Verifikationsstudie waren gegenüber den Ergebnissen der prüfstandbasierten Studie plausibel. Die Absolutwerte der am Prüfstand erzeugten Ergebnisse waren leicht niedriger, jedoch stimmten die Relativwerte bezogen auf die Grundbelastung ( $110 / 0$  bzw.  $100 / -$ ) gut überein.

Der Einfluss der Querkraft auf den  $a_{hv}$ -Wert am Hauptgriff hing sehr stark von der Belastung ab. Bei der Belastung des Setups 2 der Verifikationsstudie nahmen die  $a_{hv}$ -Werte durch eine Erhöhung der Querkräfte ab. Bei der Belastung des Setups 1 nahm der  $a_{hv}$ -Wert bei einer Vorschubkraft von 110 N um 16 % zu, wohingegen diese bei einer Vorschubkraft von 170 N abnahm. Die Ergebnisse des prüfstandbasierten Experiments wiesen eine Zunahme des  $a_{hv}$ -Wertes bei einer Erhöhung der Querkraft von 23 bzw. 27 % auf. Auf Basis der unterschiedlichen Effekte können zwei Hypothesen abgeleitet werden. Zum einen erhöht sich beim manuellen Hammerbohren durch das Aufbringen einer Querkraft vermutlich die Greifkraft. Nach Lindenmann et al. (2021) korreliert eine Erhöhung der Greifkraft mit einer Erniedrigung des  $a_{hv}$ -Wertes. Am Prüfstand bleibt die Greifkraft bzw. der Einspannzustand konstant. Zum anderen erhöht sich durch eine zusätzlich aufgebrachte Querkraft der Verspannungszustand des menschlichen Arms. Wie die Analyse des HAM in Kapitel 8.5 zeigt, besteht bei den eingesetzten Elastomeren in Vorschubrichtung ein linearer Zusammenhang zwischen Kraft und Auslenkung. Dadurch erhöht sich auf dem Prüfstand die dynamische Steifigkeit nicht. Wie bereits dargestellt, wird vermutet, dass sich diese beim Menschen jedoch erhöht.

Daraus kann geschlossen werden, dass auf Basis des Prüfstands Erkenntnisse zum Einfluss der Querkraft entkoppelt von den Greifkräften erforscht werden können. Jedoch ist fraglich, inwieweit die dynamischen Schwingungseigenschaften des HAM in Querrichtung mit denen des Menschen übereinstimmen. Der Einfluss der Vorschubkraft auf die  $a_{hv}$ -Werte ist dagegen gut auf das manuelle Hammerbohren übertragbar.

### **Vergleich der $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse**

Der Vergleich der  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse zeigte, dass die Absolutwerte, welche auf dem Prüfstand generiert wurden, zu niedrig waren. Der Trend der relativen Änderungen bezogen auf den Grundzustand stimmte sowohl mit der Quer- als auch mit der Vorschubkraft mit beiden Setups der Verifikationsstudie überein. Wie bereits bei der Analyse der ROP zeigte sich hier ebenfalls, dass in den Studien auf dem Prüfstand eher die Belastung durch das Setup 1 abgebildet wurde. Der negative Einfluss bzw. negative Zusammenhang zwischen der Querkraft und den  $a_{hv}$ -Werten am Gehäuse konnte anhand der Korrelationsanalyse aus Kapitel 5.2.3.2 nicht aufgezeigt werden. Anhand der Verifikation kann geschlossen werden, dass die auf dem Prüfstand erzeugten Ergebnisse bezogen auf die relativen Änderungen sehr gut übertragbar sind.

## **Vergleich der $a_{hv}$ -Werte am Seitengriff**

Der Vergleich der  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse und der  $a_{hv}$ -Werte am Seitengriff der Verifikationsstudie zeigte, dass die Absolutwerte am Gehäuse höher waren. Beim Betrachten der relativen Änderungen bezogen auf die Grundbelastung zeigte sich, dass diese sehr gut miteinander vergleichbar waren. Somit können Erkenntnisse, welche in dieser Arbeit bezogen auf die relativen Änderungen der  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse erforscht wurden, auf die  $a_{hv}$ -Werte am Seitengriff übertragen werden.

## **Zwischenfazit**

Die Ergebnisse der Verifikationsstudie zeigen, dass die Ergebnisse des Prüfstands mit denen der manuellen Versuche bezüglich der ROP und der Schlagzahl sehr gut miteinander vergleichbar sind. Hierbei bestehen lediglich in den Absolutwerten geringe Unterschiede. Bezüglich des  $a_{hv}$ -Wertes am Hauptgriff weichen die am Prüfstand erzeugten Werten von denen aus den manuellen Versuchen ab. Um nachvollziehen zu können, wodurch diese Abweichung entsteht, wird nachfolgend eine theoretische Betrachtung der Belastung am Prüfstand durchgeführt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können die Ergebnisse besser eingeordnet und Anforderungen für zukünftige Prüfstände abgeleitet (Forschungsfrage 6) werden.

## **8.5 Theoretische Betrachtung des Kräftesystems am Prüfstand**

Aus dem Vergleich der Ergebnisse des manuellen mit denen des automatisierten Hammerbohrers kann geschlossen werden, dass die Art der Belastung der aufgebrachten Kräfte einen bedeutenden Einfluss hat. Dies beinhaltet den Angriffspunkt der Kräfte bezogen auf die Bohrerachse sowie die Kraftverteilung zwischen vorderer und hinterer Bohrhammereinspannung. Aufgrund dessen wird in diesem Unterkapitel das Kräftesystem des Prüfstandes analysiert. Dies ermöglicht einen Vergleich der Belastung beim manuellen gegenüber dem automatisierten Bohren. Erst durch die dadurch gewonnenen Erkenntnisse können die Anforderungen für zukünftige Versuchsumgebungen, zur Abbildung der Anwenderkräfte definiert werden. Wie in Abbildung 8.3 zu sehen ist, wird die vom Roboter erzeugte Kraft über das HAM auf den Bohrhammer aufgebracht. Das HAM leitet die Kräfte über die hintere und vordere Anbindung in das Bohrhammergehäuse ein. Neben den Federn und den Elastomeren des Modells besitzen beide in dieser Forschungsarbeit verwendete Bohrhämmer eine Schwingungsentkopplung des Hauptgriffs und somit das Gesamtsystem eine zusätzliche Nachgiebigkeit. Im Nachfolgenden werden die Ersatzsteifigkeiten und aufbauend darauf die

Kräfteverteilungen der einzelnen Anbindungen bestimmt. Neben der Vorschubrichtung wurden ebenso die Ersatzsteifigkeit des Systems und die Kräfteverteilung in Querkraftfrichtung untersucht.

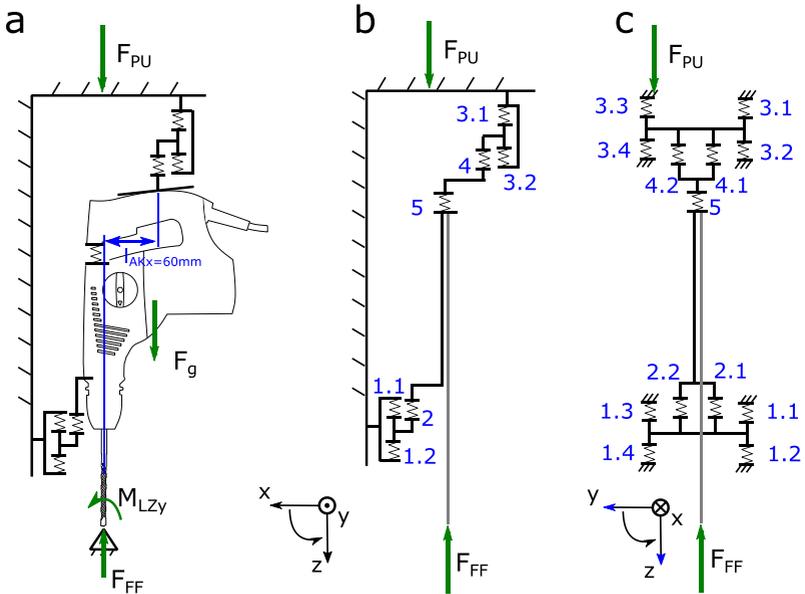


Abbildung 8.3: Schematische Darstellung der wirkenden Kräfte am Bohrhämmer (a) sowie des Federersatzsystems in Seiten- (b) und Draufsicht (c) bestehend aus Hand-Arm-Modell und Schwingungsentkopplung des Bohrhammers in Vorschubrichtung (z-Richtung). Die untere Anbindung besteht aus den Elementen 1 und 2, die obere Anbindung aus den Elementen 3 und 4. Das dargestellte Element 5 entspricht der Schwingungsentkopplung des Bohrhammers.

Die Ersatzfederkonstante für parallel geschaltete Federn kann anhand der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i \quad 8.1$$

Für die Berechnung der Ersatzkonstante einer Reihenschaltung wird folgende Formel verwendet:

$$\frac{1}{D} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i} \quad 8.2$$

Alle Spiralfedern des HAM haben dieselbe Federsteifigkeit  $d$ . Aufgrund dessen lautet die Ersatzkonstante für  $D_{1,1,1,2}$ :

$$D_{1,1,1,2} = 2 \cdot d_{FS} \quad 8.3$$

sowie für das Gesamtpaket der vorne und hinten verwendeten Federpakete zu:

$$D_1 = D_3 = 4 \cdot d_{FS} \quad 8.4$$

Die Spiralfedern sind mit den beiden parallelgeschalteten Elastomeren wiederum in Reihe geschaltet. Daraus kann die Formel zur Bestimmung von  $D_{1,2}$  abgeleitet werden:

$$\frac{1}{D_{1,2}} = \frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \quad 8.5$$

Im HAM wird dasselbe Paket aus Federn und Elastomeren für die vordere und hintere Anbindung verwendet. Die Federsteifigkeit der Griffentkopplung befindet sich jedoch noch in Reihe zur hinteren Ankopplung und muss deshalb wie folgt berechnet werden:

$$\frac{1}{D_{3,4,5}} = \frac{1}{D_3} + \frac{1}{D_4} + \frac{1}{D_5} \quad 8.6$$

Die Gesamtersatzkonstante des HAM für die Anwendung mit Bohrhammer ohne Schwingungsentkopplung des Hauptgriffs ergibt sich aus:

$$D_{ohne} = D_{1,2} + D_{3,4} = 2 \cdot D_{1,2} \quad 8.7$$

Die Gesamtersatzkonstante des HAM für die Anwendung mit Bohrhammer mit Schwingungsentkopplung des Hauptgriffs berechnet sich hingegen wie folgt:

$$D_{mit} = D_{1,2} + D_{3,4,5} \quad 8.8$$

Für die Druckbeanspruchung von Elastomeren gelten folgende Gleichungen zur Bestimmung der Federkonstante:

$$d_{Ed} = \frac{A_g \cdot E_r}{h_E} \quad 8.9$$

mit

$$A_g = \frac{d_E^2 \cdot \pi}{4} \quad 8.10$$

und

$$E_r = K \cdot G \quad 8.11$$

Das Schubmodul G hängt von der Shorehärte und der Formfaktor K hängt vom Formkennwert  $K_f$  ab und können beide aus den entsprechenden Diagrammen (siehe Anhang D Abbildung D.1 und D.2) bestimmt werden.

$$K_f = \frac{d_E}{4 \cdot h_E} \quad 8.12$$

Da sowohl an der vorderen als auch hinteren Anbindung zwei Elastomere parallel geschaltet sind ergibt sich für die Ersatzkonstanten:

$$D_2 = D_4 = 2 \cdot d_{Ed} \quad 8.13$$

Die für die Berechnung notwendigen Parameterwerte können aus der Tabelle 8.4 entnommen werden. Die zugehörigen Ergebnisse sind in der Tabelle 8.5 und Tabelle 8.6 zusammengefasst.

Tabelle 8.4: Eigenschaften der relevanten Parameter des Hand-Arm-Modells zur Bestimmung der Ersatzfedersteifigkeiten

Parameter	Wert
Federkonstante Federn HAM $d_{FS}$	15.709 N/mm
Shorehärte der Elastomere	63 Shore
Durchmesser Elastomere $d_E$	25 mm
Höhe Elastomere $h_E$	19.4 mm
Formfaktor K	4.83
Schubmodul G	0.937 N/mm <sup>2</sup>
Länge $l_1$	45 mm
Länge $l_2$	65 mm

Für die Berechnung der Kraftverteilung der beiden Bohrhammeranbindungen in Querkraftrichtung muss wiederum die Ersatzfedersteifigkeit ermittelt werden. Da die Spiralfedern in dieser Konstruktion in Querkraftrichtung keine Kräfte aufnehmen können, müssen lediglich die Elastomere berücksichtigt werden. Wie in der Abbildung 5.5 nachvollzogen werden kann, kann der Bohrhammer durch den Bohrer im Bohrloch als fest eingespannt betrachtet werden. Somit kann bei einer Drehbewegung und einem ideal steifen Bohrhammer-Bohrer-System diese sich nur um die Bohrspitze drehen. Zur Berechnung der jeweiligen Auslenkung der Einspannungen kann somit der Strahlensatz herangezogen werden:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \quad 8.14$$

Da die Elastomere nun einem Parallelschub ausgesetzt sind, muss die hierfür geltende Gleichung herangezogen werden:

$$d_{ES} = \frac{A_g \cdot G}{h_E} \quad 8.15$$

Für die Größen  $A_g$ ,  $h$  und  $G$  können die bereits berechneten Werte genutzt werden. Zwar sind alle vier Elastomere parallelgeschaltet und besitzen die gleiche Federsteifigkeit. Die obere Anbindung erfährt jedoch gegenüber der unteren Anbindung einen unterschiedlichen Weg:

$$F_{LF} = s_{s1} \cdot 2 \cdot d_{ES} + s_{s2} \cdot 2 \cdot d_{ES} \quad 8.16$$

Aus Gleichung 8.16

folgt:

$$s_2 = \frac{F_{LF}}{2 \cdot d_{ES} \cdot \left(1 + \frac{l_1}{l_1 + l_2}\right)} \quad 8.17$$

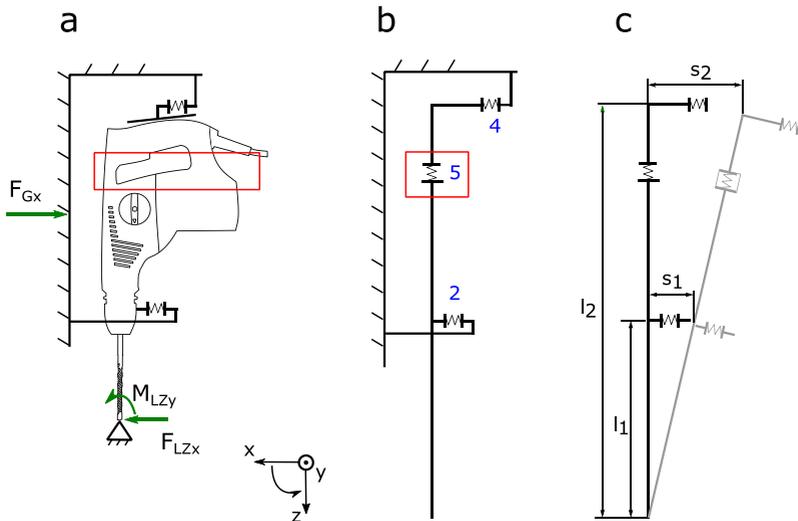


Abbildung 8.4: Schematische Darstellung der wirkenden Kräfte am Bohrhämmer (a), das Federersatzsystem (b) bestehend aus Hand-Arm-Modell und Schwingungsentkopplung des Bohrhammers in Querkraft Richtung (x-Richtung) und die zum Strahlensatz zugehörige Länge zur Bestimmung der Elastomerauslenkung (c). Die untere Anbindung besteht aus dem Element 2, die obere Anbindung aus dem Element 4. Das dargestellte Element 5 entspricht der Schwingungsentkopplung des Bohrhammers.

Werden nun die entsprechenden Werte aus Tabelle 8.4 eingesetzt, können die in der Tabelle 8.5 und Tabelle 8.6 aufgelisteten Größen ermittelt werden.

Tabelle 8.5: Berechnungsergebnisse der Ersatzfedersteifigkeiten zwischen unterer und oberer Anbindung für die Vorschub- und Querrichtung. Zusätzlich ist das aus den Ersatzfedersteifigkeiten abgeleitete Kraftverhältnis für die Querrichtung angegeben.

<b>Ergebnisse</b>	<b>Wert</b>
<u>Vorschubrichtung:</u>	
Formkennwert $K_f$	0.322
Rechnerisches E-Modul $E_r$	4.52 N/mm <sup>2</sup>
Gebundene Druckfläche $A_g$	490.87 mm <sup>2</sup>
Federkonstante Federpakete $D_1$	62.84 N/mm
Federkonstante Elastomere (Druckbeanspruchung) $d_{ED}$	114.37 N/mm
Ersatzfederkonstante $D_{1,2}$ bzw. $D_{3,4}$	49.29 N/mm
<u>Querrichtung:</u>	
Federkonstante Elastomere (Schubbeanspruchung) $d_{ES}$	23.7 N/mm
Verschiebung untere Anbindung (kurzer Bohrer) $s_1$	0.39 mm
Verschiebung obere Anbindung (kurzer Bohrer) $s_2$	0.89 mm
Querkraft untere Anbindung (kurzer Bohrer) $F_1$	18.2 N
Querkraft obere Anbindung (kurzer Bohrer) $F_2$	42 N
<b>Verhältnis <math>F_2</math> zu <math>F_1</math> (kurzer Bohrer)</b>	<b>2.28</b>
Verschiebung untere Anbindung (langer Bohrer) $s_1$	0.45 mm
Verschiebung obere Anbindung (langer Bohrer) $s_2$	0.82 mm
Querkraft untere Anbindung (langer Bohrer) $F_1$	21.3 N
Querkraft obere Anbindung (langer Bohrer) $F_2$	38.6 N
<b>Verhältnis <math>F_2</math> zu <math>F_1</math> (langer Bohrer)</b>	<b>1.82</b>

Die berechneten Ergebnisse zeigen, dass die Kraftverteilung in Vorschubrichtung von der Schwingungsentkopplung des Bohrhammers sowie der aufgebracht

Vorschubkraft abhängt. Zusätzlich hängt die Verteilung auch vom Angriffspunkt der Kraft am Hauptgriff ab. Da die oberen Griffanbindungen beider Bohrhämmer niedrigere Federsteifigkeiten als die unteren besitzen, reduziert sich die Gesamtfedersteifigkeit je weiter oben am Hauptgriff angegriffen wird. Dies ist in der im Anhang D Abbildung D.3 bis D.5 dargestellten Untersuchung aufgezeigt worden. Die beschriebene Position 1 entspricht in etwa dem Prüfstand. Beim manuellen Hammerbohren wird im Normalfall eine Andruckkraft im Bereich zwischen Position 1 und 2 aufgebracht. Die ermittelten Kraftverhältnisse mit einem Wert über 1 zeigen, dass aufgrund der in Reihe geschalteten Schwingungsentkopplung des Griffs mit der hinteren Anbindung mehr Kraft über die vordere Anbindung aufgeprägt wurde. Das Verhältnis der aufgebracht Kraft verschiebt sich immer mehr zur hinteren Einspannung je höher die Steifigkeit der Griffentkopplung ist. Diese steigt bei beiden Bohrhämmern mit der Erhöhung der Vorschubkraft.

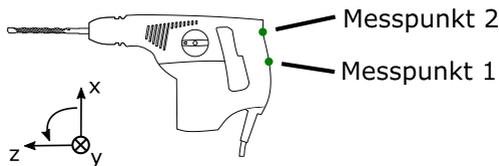


Abbildung 8.5: Kraftangriffspunkte am Hauptgriff zur Bestimmung der Federsteifigkeiten der Schwingungsentkopplung beider Bohrhämmer

Bei einer Belastung in Querrichtung sind die Länge des Bohrers sowie der Abstand der hinteren zur vorderen Einspannung des Bohrhammers entscheidend. Dies kann anhand des Strahlensatzes (Gleichung 8.17) aufgezeigt werden. Aufgrund der unterschiedlich starken Auslenkung der beiden Elastomerpaketen (2 und 4) wird in etwa doppelt so viel Kraft über den Hauptgriff eingeleitet. Hierbei gilt: Je länger der Bohrer ist, desto mehr Kraft wird über die vordere Anbindung übertragen.

Tabelle 8.6: Ermittelte Kraftverhältnisse zwischen unterer ( $F_u$ ) und oberen ( $F_o$ ) Anbindung des Hand-Arm-Modells für unterschiedliche Vorschubkräfte (VK). Die Analyse wurde für beide Bohrhämmer sowie zwei Angriffspunkten der oberen Einspannung durchgeführt.

VK [N]	Hilti Pos. 1 $F_u/F_o$	Bosch Pos. 1 $F_u/F_o$	Hilti Pos. 2 $F_u/F_o$	Bosch Pos. 2 $F_u/F_o$
80	2.85	2.97	3.34	3.46
110	2.75	2.84	3.24	3.24
140	2.62	2.73	3.08	3.08
170	2.51	2.59	2.88	2.91
200	2.40	2.48	2.73	2.75
230	2.31	2.37	2.59	2.61

## 8.6 Gesamtdiskussion der Verifikationsstudie

Die Ziele dieser Arbeit sind einerseits die Höhe der von Anwendern während dem Hammerbohren aufgetragenen Querkräften zu ermitteln, andererseits soll der Zusammenhang zwischen den Querkräften mit aus ergonomischer Sicht relevanten Bewertungsgrößen erforscht werden. Um diese beiden Forschungsziele untersuchen zu können, wurden zunächst ein manuelles und anschließend ein prüfstandbasiertes Hammerbohren durchgeführt. Die prüfstandbasierten Versuche haben zwar den Vorteil der Reproduzierbarkeit, jedoch müssen die Einflüsse des Ersatzmodells des Menschen berücksichtigt werden. Das verwendete HAM, welches die Schwingungseigenschaften des Menschen simuliert, wurde für Kräfte in translatorischer Bohrrichtung von Cronjäger et al. (1984) entwickelt und seine Gültigkeit hierfür nachgewiesen. Anhand der abschließend durchgeführten Verifikationsstudie wurde untersucht, inwieweit dieses HAM in Interaktion mit dem restlichen Prüfstand valide Ergebnisse erzeugt, wenn hierbei zusätzlich Querkräfte aufgebracht werden. Im nachfolgenden Unterkapitel 8.6.1 findet auf Basis dieser Ergebnisse eine Diskussion über die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf das manuelle Hammerbohren statt. Die Studie sowie der Abgleich mit den Ergebnissen der explorativen Studie diente weiterhin dazu, die Erzeugung von Querkräften tiefergreifender zu verstehen und Potentiale für zukünftige HAM bzw. Prüfstände zur realitätsnahen Erzeugung von Andruck- und Querkräften aufzudecken. Diese Ergebnisse werden im Unterkapitel 8.6.2 diskutiert.

## **8.6.1 Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf das manuelle Hammerbohren**

Beim Vergleich der aufgetretenen Belastungen am Prüfstand und beim manuellen Bohren werden die Vorschub- und Querkraft separat betrachtet. Wie im Kapitel 5.1.4 aufgezeigt, führt die Vorschubkraft im Falle einer exzentrisch zur Bohrerachse eingeleiteten Andruckkraft zu einer Querkraft oder zu einem Moment im Bohrloch um die Bohrerspitze. Dies hat einen Einfluss auf den Bohrprozess und wird deshalb zusätzlich zur Querkraft untersucht. Bei manuellen Versuchen aus Kapitel 5 hat sich gezeigt, dass das Kraftverhältnis der Andruckkraft vom Hauptgriff zum Seitengriff in etwa einen Faktor zwischen 1.7 und 3.5 besitzt. Durch die Schwingungsentkopplung des Hauptgriffs, welche bei den Untersuchungen von Cronjäger et al. (1984) nicht vorhanden war, verändert sich dieses Verhältnis auf dem Prüfstand deutlich und es wird mehr Kraft über die vordere Einspannung aufgeprägt. In den Untersuchungen ohne Schwingungsentkopplung wird ein Kraftverhältnis von 1:1 aufgebracht und entspricht somit ebenfalls nicht der tatsächlichen Belastung. Aufgrund dessen muss die Gültigkeit der Ergebnisse in Vorschubrichtung ebenfalls neu bewertet werden. Da die Schwingungsentkopplung des Hauptgriffs eine nichtlineare Federsteifigkeit aufweist, verändert sich das Kraftverhältnis bei der Erhöhung der Vorschubkraft. Dies hat zur Folge, dass zwar die Gesamtkraft konstant bleibt, die Belastung (Kraftverhältnis Hauptgriff zu Seitengriff) sich jedoch leicht ändert. Anhand der theoretischen Analyse der Querkraft konnte gezeigt werden, dass auf dem Prüfstand mehr Kraft über den Hauptgriff als über den Seitengriff aufgebracht wurde. Beim manuellen Bohren bringt der Anwender in Vorschubrichtung die meiste Kraft über den Hauptgriff auf. Dies legt nahe, dass auch große Anteile der Querkraft über den Hauptgriff eingeleitet werden. Diese Hypothese sollte jedoch in weiterführenden Studien noch nachgewiesen werden. Ein weiterer Punkt, welcher in Querkraftrichtung untersucht werden muss, ist die Steifigkeit des Anwenders. Das verwendete HAM besitzt eine lineare Federsteifigkeit. Wie sich das Hand-Arm-System des Menschen bei der Aufbringung von Querkraften verhält, ist bislang unbekannt. Ein großer Vorteil der Versuchsumgebung ergibt sich aus der entkoppelten Betrachtung der Greifkraft bzw. der Einspannung. Diese bleibt beim HAM konstant. Der Anwender hingegen muss die Greifkräfte je nach Richtung und Höhe der Querkraft in Laboruntersuchungen zwangsweise erhöhen, um eine Querkraft aufbringen zu können. Mit Hilfe des Strahlensatzes konnte zusätzlich gezeigt werden, dass durch die aktuelle Konstruktion des HAM ein Nachteil entsteht, sobald Setups mit unterschiedlichen Maßen untersucht werden. Verändert sich aufgrund der Bohrhammergeometrie der Abstand zwischen hinterer und vorderer Einspannung oder insbesondere die Bohrerlänge, wird ein anderes Kraftverhältnis über die Anbindungen des HAM übertragen. Dies hat zur Folge, dass die längeren Hohlbohrer nicht direkt mit den beiden Wendelbohrern vergleichbar sind.

Aus den Erkenntnissen zu dem HAM in Kombination mit dem Vergleich der einzelnen Experimentergebnisse kann die Übertragbarkeit der automatisierten Versuche auf das manuelle Hammerbohren bewertet werden. Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass die aufgebrachte Querkraft von 60 N im normalen Bohrvorgang einen extremeren Fall darstellt, welcher jedoch in den manuellen Versuchen mit professionellen Anwendern auftrat. Bei der Bewertungsgröße Vibration insbesondere am Hauptgriff spielt die Kraftverteilung der Andruckkraft eine größere Rolle. Für die Größen Bohrerverschleiß, Schlagfrequenz und ROP nimmt die Vorschubkraft, und somit nicht die Kraftverteilung an den einzelnen Positionen, eine übergeordnete Rolle bezüglich der Beeinflussung dieser Größen ein. Sie werden jedoch in geringem Maße durch den Abstand des resultierenden Andruckkraftvektors zur Bohrachse beeinflusst. Die Ergebnisse der Studie II hinsichtlich des Einflusses der Vorschubkraft und Querkraft auf den Bohrerverschleiß sind weitestgehend übertragbar. Wobei durch eine Andruckkraft, welche primär über den Hauptgriff aufgebracht wird, grundsätzlich eher einen stärkeren Verschleiß hervorrufen sollte. Die Höhe des Wendelverschleißes wird durch die Art der Querkraftaufbringung beeinflusst. Da diese in den prüfstandbasierten Studien jedoch als realistisch angesehen wird, sollten auch die gewonnenen Erkenntnisse übertragbar sein. Ähnlich wie bei dem Verschleiß ist der Einfluss der Anwenderkräfte auf die Größen ROP und Schlagfrequenz gut übertragbar. Dies kann damit erklärt werden, dass hier ebenfalls die Vorschubkraft relevant ist. Allerdings sollte in zukünftigen Prüfständen die Andruckkraft stärker über den Hauptgriff als über den Seitengriff aufgebracht werden. Ansonsten ist die am Prüfstand gemessene ROP durch das fehlende Biegemoment etwas zu hoch gegenüber dem manuellen Bohren. Die Untersuchungen zeigen, dass der Anwender bei der aktuellen Bohrhammerkonstruktion immer eine Querkraft oder ein Biegemoment erzeugen muss. Dies birgt Entwicklungspotential die ROP dadurch zu erhöhen, dass die aufgebrachte Andruckkraft in der Bohrachse wirkt. Im Gegensatz zur Übertragbarkeit der Ergebnisse der  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse, sind die Ergebnisse der  $a_{hv}$ -Werte am Hauptgriff kritisch zu hinterfragen. In Querkraftrichtung bildet das HAM vermutlich nicht die gleiche Schwingungscharakteristik wie beim Anwender ab, sobald hierbei Querkräfte wirken. Beim Aufbringen einer Vorschubkraft über das verwendete HAM wirkt am Hauptgriff eine kleinere Andruckkraft als beim manuellen Bohren, da diese hauptsächlich über die vordere Anbindung übertragen wird. Somit wird die Feder der Griffentkopplung geringfügiger komprimiert. Dies hat zur Folge, dass die Masse des HAM und des Griffs weniger stark an das Bohrhammergehäuse angebunden werden. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Prüfstand auf unterschiedliche technische Systeme kann nur bedingt beantwortet werden. Ohne konstruktive Anpassungen am HAM können in Vorschubrichtung lediglich Systeme verglichen werden, welche eine ähnliche Federsteifigkeit der Griffentkopplung besitzen. Dies war in bei den beiden

Bohrhämmern aus dieser Arbeit jedoch der Fall. Bei der Analyse des Einflusses von Querkräften muss eine identische Bohrerlänge verwendet werden, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Die Aussagen, welche mit dem HAM erforscht wurden, sind grundsätzlich valider als starre Einspannungen, welche oftmals in der Industrie verwendet werden. Durch eine starre Anbindung entstehen keine Querkräfte bzw. kein Biegemoment, welche durch die exzentrische Andruckkraft hervorgerufen wird. Des Weiteren würde bei einem Bohrerhammer mit Schwingungsentkopplung nahezu die gesamte Kraft über die vordere Einspannung übertragen werden. Da diese im Gegensatz zur hinteren Einspannung nicht mit der Schwingungsentkopplung in Reihe geschaltet ist.

Die Ergebnisse der Vorschubgeschwindigkeit sowie der Schlagfrequenz der Verifikationsstudie stimmten sehr gut mit denen aus den prüfstandbasierten Studien überein. Da bei diesen Größen die Belastung am Bohrer eine große Rolle spielte, wurde daraus geschlossen, dass die Erkenntnisse zum Bohrerverschleiß ebenfalls Gültigkeit haben. Die  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse waren in den prüfstandbasierten Untersuchungen niedriger als beim manuellen Bohren. Die relativen Änderungen durch Variation der Quer- und Vorschubkraft waren jedoch vergleichbar. Die Bewertung der  $a_{hv}$ -Wertänderungen am Hauptgriff ist hingegen nicht so eindeutig. Die Einflüsse der Vorschubkraft sollten hier ebenso übertragbar sein. Der in den prüfstandbasierten Untersuchungen ermittelte Anstieg des  $a_{hv}$ -Wertes durch eine Erhöhung der Querkraft konnte in den Versuchen mit Probanden nur unter besonderen Randbedingungen nachgebildet werden. Da bei diesen Versuchen die Greifkraft einen Einfluss hatte und dort nicht konstant gehalten wurde, konnte der Einfluss der Querkraft auf die Vibrationen am Hauptgriff jedoch nicht sicher ermittelt werden. Aufgrund dessen wurde nachfolgend das verwendete HAM untersucht, um die ermittelten Abweichungen bewerten zu können.

### **8.6.2 Anforderungsdefinition für zukünftige Prüfstände**

Abschließend wird auf Basis der vorweg durchgeführten Analyse des HAM Anforderungen und erste Optimierungsvorschläge für zukünftige HAM abgeleitet und somit Forschungsfrage 6 beantwortet. Dies ist notwendig, damit valide Querkraftuntersuchungen bzw. Analysen über den Hammerbohrprozess auf Prüfständen durchgeführt werden können.

Ein wichtiger Optimierungsschritt ist die Kraftaufbringung in Vorschubrichtung. Im Stand der Forschung werden entweder HAM verwendet, welche die komplette Anwenderkraft über den Hauptgriff aufbringen oder HAM mit zwei Anbindungen. Bei Letzteren wird das Kraftverhältnis durch die Ersatzsteifigkeiten der beiden

Anbindungen sowie der Schwingungsentkopplung des Griffs bestimmt. Dies hat auch zur Folge, dass Bohrhämmer mit unterschiedlichen Federsteifigkeiten nur bedingt miteinander vergleichbar sind. Untersuchungen in der Industrie werden zumeist mit einer starren Einspannung, insbesondere an der vorderen Anbindung, durchgeführt. Bei Bohrhämmern mit Schwingungsentkopplungen am Hauptgriff wird dadurch nahezu die komplette Kraft über diese Einspannung aufgebracht. Die beschriebenen Varianten an HAM besitzen alle den Nachteil durch die Modellreduktion eine fehlerhafte Kraftaufbringung zu erzeugen. Eine definierte Kraftverteilung einzustellen, ist nur möglich, wenn die Schwingungseigenschaften der beiden Ankopplungen entkoppelt von der Andruckkraft einstellbar sind. In einer Veröffentlichung von Hao et al. (Hao, Mullins & Cronin, 2017) wurde eine technische Lösung einer Konstantkraftfeder vorgestellt. Diese ermöglicht es über einen gewissen Weg eine konstante Kraft einzustellen. Wird diese Federart mit unterschiedlichen Charakteristiken an beiden Anbindungen des Bohrhammers angebracht, kann je Anbindung eine gewünschte Kraft eingestellt werden.

Bei der Betrachtung der Querrichtung ergibt sich ein ähnliches Problem. Hierbei spielt jedoch der Hebelarm durch die Bohrerlänge eine entscheidende Rolle. Je länger der Bohrer ist, desto mehr Kraft wird über die vordere Einspannung aufgebracht. Jedoch wird, bei einem in Querrichtung in sich starrem Bohrhammer, immer mehr Kraft über den Hauptgriff aufgebracht. Wie in Vorschubrichtung könnten Konstantkraftfedern eingesetzt werden, um die gewünschte Kraft an der jeweiligen Einspannung aufzubringen. Allerdings fehlt bislang das Wissen, wie sich das Kraftverhältnis der beiden Anbindungen verhält. Hier besteht noch Forschungsbedarf. Eine weitere Analyse sollte bezüglich der Federsteifigkeiten bzw. des Impedanzverhalten des Menschen in Querrichtung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Querkräfte erfolgen. Erst dadurch wird es möglich HAM auszulegen, welche sich bei Querkräften identisch zum Menschen verhalten.

## **8.7 Zusammenfassung**

Das Ziel der Verifikationsstudie war es, den Nachweis zu erbringen, ob auf dem Prüfstand die gleiche Belastung wie beim manuellen Hammerbohren mit professionellen Anwendern aufgebracht wurde und ob sich dadurch ein vergleichbares Verhalten des Bohrhammers auf dem Prüfstand wie beim manuellen Hammerbohren eingestellt hatte.

Bei der Bewertung der Belastung sind zwei Aspekte entscheidend. Zum einen ist die Regelung des Roboters, welche die Vorschub- und Querkräfte konstant halten

muss, relevant. Die Ergebnisse der Charakterisierung der Regelung haben gezeigt, dass dieser Aspekt erfüllt ist. Zum anderen ist ebenso die Konstruktion des HAM entscheidend. Beim manuellen Hammerbohren ist der Mensch über den Seitengriff und den Hauptgriff an den Bohrhämmer gekoppelt. Hierbei erzeugt er je Griff unterschiedliche Kräfte und besitzt, je nach Armhaltung und erzeugter Kraft, unterschiedliche Steifigkeiten. Beim Vergleich des Prüfstandes und der beim Anwender wirkenden Kräfte zeigte sich, dass die Kraftverhältnisse der Andruckkräfte an den beiden Griffen am Prüfstand nicht vergleichbar aufgeprägt wurden. Die Gesamtkraft des Anwenders in Vorschubrichtung sowie dessen Schwingungseigenschaften wurden jedoch sehr gut abgebildet. Die Aufbringung der Querkraft wurde ebenfalls realistisch abgebildet. Es fehlen jedoch Daten, über welchen Griff die Querkraft beim manuellen Hammerbohren tatsächlich eingeleitet wird. Eine Herausforderung ergibt sich bei der Analyse von unterschiedlichen Bohrerlängen miteinander, da die Verteilung der Querkraft an den beiden Einspannungen von der Bohrerlänge abhängt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde bereits erste Lösungsansätze abgeleitet und weiterer Forschungsbedarf aufgedeckt.

Wie eingangs beschrieben war es ein weiteres Ziel in diesem Kapitel, die Vergleichbarkeit des Bohrhämmerverhaltens zu untersuchen und folglich eine Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Prüfstand auf das manuelle Hammerbohren zu bewerten. Zusammenfassend kann geschlossen werden, dass Größen wie die Vorschubgeschwindigkeit, der Bohrerverschleiß und die Schlagfrequenz stärker von der Gesamtbelastung (Vorschubkraft) des Bohrhammers abhängig sind als von dem genauen Kraftverhältnis (Andruckkraftverhältnis je Griff), mit dem dieser belastet wird. Deshalb sind die auf dem Prüfstand erzielten Ergebnisse bezogen auf diese Größen sehr gut übertragbar. Die Belastung beim manuellen Bohren könnte jedoch tendenziell etwas höher sein, da die Andruckkraft mit einem größeren Abstand zur Bohrachse aufgebracht wird als auf dem Prüfstand. Bei der Analyse der Übertragbarkeit der Vibrationsergebnisse ist insbesondere das Verhalten und der Einfluss des HAM zu betrachten. Das verwendete HAM wurde für Bohrhämmer ohne Schwingungsentkopplung konzipiert und validiert. Es hat sich gezeigt, dass die Schwingungsentkopplung die Belastungsverhältnisse der beiden Einspannungen deutlich beeinflusst. Daraus resultiert, dass die Schwingungen am Gehäuse bzw. am Seitengriff bei den Versuchen auf dem Prüfstand etwas höher sind als bei den manuellen Versuchen. Dies kann durch die höhere Andruckkraft an der vorderen Einspannung erklärt werden. Relative Änderungen der Gehäusevibration aufgrund der Einflüsse der Vorschubkraft sind jedoch sehr gut übertragbar. Die Ergebnisse am Hauptgriff sind hingegen kritischer zu betrachten. Durch das Aufbringen einer Querkraft verhielt sich der  $a_{hv}$ -Wert gegenläufig zu den manuellen Versuchen. Die Erklärung hierfür kann keinem Effekt sicher zugeordnet

werden. Vorteile bietet der Prüfstand dahingehend, dass die Greifkraft konstant eingestellt wird. Diese hat einen negativen Einfluss auf die  $a_{hv}$ -Werte und stieg bei den manuellen Versuchen mit Erhöhung der Querkraft an. Jedoch liegt die Vermutung nahe, dass durch das Aufbringen von Querkraften sich das Hand-Arm-System des Menschen versteift. Bei den Untersuchungen überlagerten sich somit die Einflüsse des Menschen. Aufgrund dessen kann nicht eindeutig festgestellt werden, wie gut die Ergebnisse bezüglich des  $a_{hv}$ -Wertes am Hauptgriff bei der Aufbringung von Querkraften vom Prüfstand auf das manuelle Hammerbohren übertragen werden kann. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird zunächst die wissenschaftliche Ausarbeitung zusammengefasst und hierbei die relevantesten Erkenntnisse aufgezeigt. Anschließend werden mögliche Forschungsaspekte vorgestellt, welche sich auf Basis der in dieser Arbeit erforschten Erkenntnissen ableiten lassen.

### 9.1 Zusammenfassung

Das Forschungsziel der vorliegenden Arbeit adressiert die Analyse der Höhe von Querkräften beim Hammerbohren und deren Einfluss auf Größen, welche für die nutzerzentrierte Produktentwicklung relevant sind. Als Bewertungsgrößen wurden die Vorschubgeschwindigkeit sowie die frequenzbewertete Beschleunigung in Form des  $a_{hv}$ -Wertes herangezogen. Diese beiden Größen werden durch viele Faktoren beeinflusst, weshalb die Querkraft in dieser Arbeit nicht isoliert betrachtet wurde. Die Teilsysteme Anwender, technisches System und Umwelt interagieren miteinander. Deshalb wurden in den durchgeführten Studien sowohl die Vorschubkraft, der Bohrerhammer, der Bohrer und dessen Zustand als auch die Betonfestigkeit variiert.

Um das Forschungsziel dieser Arbeit erreichen zu können, wurden vier Experimente durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde eine explorative Studie genutzt, um anhand von manuellen Versuchen zu analysieren, welche Größenordnung die Querkräfte haben und wodurch diese entstehen. Anschließend wurde eine prüfstandbasierte Versuchsumgebung entwickelt, wodurch ein automatisiertes Hammerbohren in einen realen Untergrund unter reproduzierbaren Anwendereinflüssen gewährleistet werden konnte. Mit Hilfe dieser Versuchsumgebung wurden die Zusammenhänge zwischen der Querkraft und den Größen Bohrerverschleiß, Vorschubgeschwindigkeit und der Bohrhammervibration erforscht. Die Analyse unterschiedlicher Einflussfaktoren in Kombination mit dem Verschleiß führte zu einer hohen Versuchsanzahl. Um diese auf eine handhabbare Anzahl zu verringern, wurden einige der Faktoren aufgeteilt und anhand zweier Experimente erforscht. Im abschließenden Schritt fand die Verifikation der auf dem Prüfstand erzeugten Ergebnisse durch Versuche mit manuellem Hammerbohren statt. Dadurch wurde untersucht, inwieweit die auf dem Prüfstand gewonnenen Erkenntnisse auf das manuelle Hammerbohren übertragbar waren.

Die Durchführung und Ergebnisse der explorativen Studie sind in Kapitel 5 beschrieben. Anhand der manuellen Versuche mit professionellen Anwendern konnte gezeigt werden, dass beim Hammerbohren unter Laborbedingungen Querkräfte auftraten und diese von der Interaktion zwischen der Bohrrichtung und der Vorschubkraft abhingen. Dieser Effekt entstand durch ein verstärktes Aufbringen der Andruckkraft über den Seitengriff des Bohrhammers im Verhältnis zum Hauptgriff. Weiterhin konnte anhand einer theoretischen Betrachtung des Kräftesystems die Begründung für die entstehenden Querkräfte dargelegt werden. Beim Ansetzen des Bohrhammers muss der Anwender eine Querkraft aufbringen, um das Moment, welches durch die Andruckkraft sowie das Gerätegewicht entsteht, auszugleichen. Während des eigentlichen Bohrvorgangs kann dieses Moment durch eine Querkraft des Anwenders oder durch ein Biegemoment im Bohrloch abgestützt werden.

In Kapitel 6 werden in einer kausalen Studie die Zusammenhänge zwischen der Querkraft und den Größen Vorschubgeschwindigkeit sowie  $a_{HV}$ -Wert analysiert. Die Querkraft wurde hierbei auf vier Faktorstufen eingestellt. Um die Übertragbarkeit der Zusammenhänge auf andere Systeme und Randbedingungen aufzeigen zu können, wurde die Vorschubkraft sechsstufig variiert und zwei Bohrhämmer sowie drei Bohrerarten untersucht. Anhand der Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass der tendenzielle Zusammenhang der Querkraft mit den Größen Vorschubgeschwindigkeit und Schlagfrequenz des Bohrhammers auf die unterschiedlichen Bohrer-Bohrer-Setups übertragbar war. Eine Erhöhung der Querkraft führte bei allen Systemen zu einer Verringerung der beiden abhängigen Variablen. Weiterhin konnte ein Interaktionseffekt zwischen der Querkraft und der Vorschubkraft bei der niedrigsten Vorschubkraft bewiesen werden. Die Zusammenhänge der Querkraft und der  $a_{HV}$ -Werte am Hauptgriff und Gehäuse waren deutlich stärker von den einzelnen Setups abhängig und können nicht verallgemeinert werden.

In der zweiten kausalen Studie, welche in Kapitel 7 zusammengefasst ist, wurde der Fokus auf die Interaktion der Querkraft mit den kumulierten Bohrmetern und der Betonfestigkeit gelegt. Aufgrund der dafür notwendigen großen Anzahl an Bohrungen je Bohrer wurden lediglich Extremwerte der Faktoren eingestellt. In diesen Versuchen wurde ebenso die Vorschubkraft zweistufig untersucht. Eine zusätzliche Analyse des Einflusses der Faktoren auf den Bohrer Verschleiß half, die ermittelten Effekte zu erklären. Anhand der Studie konnte nachgewiesen werden, dass die Querkraft einen starken Einfluss auf den Verschleiß der Wendel hatte. Im Gegensatz dazu konnte kein Unterschied am Hartmetallkopf des Bohrers durch eine Variation der Querkraft aufgezeigt werden. Ein Beton mit höherer Festigkeit veränderte den Verschleiß an den Seiten des Bohrkopfes. Durch diese Veränderung

konnten die Interaktionseffekte zwischen der Betonfestigkeit und den kumulierten Bohrmeter auf den  $a_{hv}$ -Wert und die Vorschubgeschwindigkeit erklärt werden. Ebenso konnte ein Interaktionseffekt zwischen der Querkraft und der Betonfestigkeit auf die Schwingungen am Hauptgriff nachgewiesen werden. Es wird jedoch vermutet, dass hier ein Interaktionseffekt 2. Ordnung vorlag und die kumulierten Bohrmeter ebenfalls eine Rolle spielten.

Die Verifikation der Erkenntnisse wird in Kapitel 8 beschrieben. Hierzu führten Probanden erneut Versuche durch. Den Probanden wurden Extremwerte der Quer- und Vorschubkraft vorgegeben. Die entstandenen Ergebnisse bezüglich der Vorschubgeschwindigkeit sowie der Schlagfrequenz stimmten sehr gut mit denen aus den prüfstandbasierten kausalen Studien überein. Da hierbei insbesondere die Belastung am Bohrer eine große Rolle spielte, wurde daraus geschlossen, dass die Erkenntnisse zum Bohrerverschleiß ebenfalls gültig sind. Die ermittelten  $a_{hv}$ -Werte am Gehäuse lagen in den prüfstandbasierten Untersuchungen niedriger als beim manuellen Bohren. Die relativen Einflüsse durch Quer- und Vorschubkraft waren jedoch vergleichbar. Die Analyse der  $a_{hv}$ -Werte am Hauptgriff gestaltete sich hingegen als komplizierter. Die Einflüsse der Vorschubkraft sollten auch hier übertragbar sein. Die in den prüfstandbasierten Untersuchungen beobachtete Erhöhung des  $a_{hv}$ -Wertes durch die Querkraft konnte in den Versuchen mit Probanden nur unter besonderen Randbedingungen nachgewiesen werden. Da bei diesen Versuchen die Greifkraft einen Einfluss hatte und dort nicht konstant gehalten wurde, konnte der Einfluss der Querkraft auf die Vibrationen am Hauptgriff nicht sicher ermittelt werden. In einer zusätzlichen Analyse wurden die Ersatzsteifigkeiten des Hand-Arm-Modells in Kombination mit den Bohrhämmern betrachtet. Diese ergab, dass im Gegensatz zum manuellen Bohren auf dem Prüfstand mindestens die Hälfte der Andruckkraft über die Einspannung des Seitengriffs auf den Bohrhämmer übertragen wurde. Durch eine Schwingungsentkopplung des Hauptgriffs eines Bohrhammers erhöhte sich dieser Anteil. Anhand dieser Erkenntnis konnte erklärt werden, dass einerseits die Schwingungen am Gehäuse niedriger waren als beim manuellen Bohren und andererseits am Hauptgriff ein anderer Belastungszustand vorlag. Aufgrund dessen sind die Schwingungsergebnisse bezogen auf den Hauptgriff kritisch zu hinterfragen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Anwender beim Hammerbohren Querkräfte aufbringt. Diese betragen unter Laborbedingungen im Median 16.7 N. Da im Labor sehr gute Randbedingungen für den Anwender vorlagen, kann angenommen werden, dass im Feld auch höhere Querkräfte auftreten. Diese Querkräfte entstehen dadurch, dass der Anwender eine zur Bohrerachse exzentrische Andruckkraft sowohl am Haupt- als auch am Seitengriff

aufbringt. Das daraus entstehende Moment wird durch das Aufbringen von Querkraften ausgeglichen. Weiterhin konnte aufgezeigt werden, dass die Querkraften beim vertikalen nach unten Bohren mit einer Erhöhung der Vorschubkraft ebenfalls zunehmen. Dieser Zusammenhang kann damit erklärt werden, dass hierbei verhältnismäßig mehr Kraft über den Seitengriff aufgebracht wird. Durch die automatisierten Versuche in Kombination mit der Verifikation durch manuelles Hammerbohren konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Querkraft auf das Hammerbohren bzw. die Ergonomie des Bohrhammers einen Einfluss hat. Hierbei konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Eine Erhöhung der Querkraft verringert den  $a_{HV}$ -Wert am Gehäuse. Dabei konnte ein starker Effekt nachgewiesen werden. Der  $a_{HV}$ -Wert am Hauptgriff erhöhte sich hingegen bei den prüfstandbasierten Versuchen. Dies konnte jedoch nicht durch Versuche mit Probanden bestätigt werden und sollte deshalb in zukünftigen Studien weiter analysiert werden.
- Durch eine Erhöhung der Querkraft verschiebt sich der Betriebspunkt des Bohrhammers, was zur Folge hat, dass die Vorschubgeschwindigkeit und Schlagfrequenz erniedrigt werden. Bei einer Querkraft von 20 N konnte kein Effekt gegenüber Versuchen ohne Querkraft nachgewiesen werden. Bei höheren Querkraften zeigte sich jedoch ein mittlerer Effekt.
- Bezogen auf den Bohrverschleiß konnte kein Effekt durch die Querkraft auf den Verschleiß des Bohrkopfs aufgezeigt werden. Wohingegen nachgewiesen werden konnte, dass die Querkraft einen starken Effekt auf den Wendelverschleiß hat.
- Der nachgewiesene Zusammenhang zwischen der Querkraft und den untersuchten Größen ist stark vom untersuchten System und den äußeren Randbedingungen abhängig und sollte deshalb in Zukunft immer systemspezifisch untersucht und in der Produktentwicklung berücksichtigt werden.

Auf Basis der durchgeführten Studien in dieser Arbeit wurde somit erstmalig das Auftreten von Querkraften beim Hammerbohren und deren Einfluss auf den Hammerbohrprozess nachgewiesen. Durch das erforschte Verständnis, wie die Querkraften die Arbeitsproduktivität und die Belastung des Anwenders beim Bohren beeinflussen, konnte ein Beitrag für das Forschungsfeld Ergonomie geleistet werden. Weiterhin unterstützen die Erkenntnisse dieser Arbeit das Testing von Bohrhämmern. So können Bohrhämmer, durch die aus den Erkenntnissen abgeleiteten Anforderungsdefinitionen für zukünftige Hand-Arm-Modelle, realitätsnäher getestet werden. Ebenso hilft hierbei zum einen die genutzte Systematik zur Abbildung von Interaktionskräften des Menschen mit einem Power-Tool auf einem Prüfstand und zum anderen wie der Einfluss dieser

Interaktionskräfte analysiert werden kann. Durch die theoretische Analyse der Entstehung von Querkräften beim Hammerbohren konnte gezeigt werden, dass bei Pistolengriffen eine Andruckkraft zu Querkräften führt. Diese Erkenntnis ist auf alle Mensch-Maschine-Systeme mit Pistolengriffen übertragbar.

## 9.2 Ausblick

Mit dem durch diese Arbeit generierten Wissen können darauf aufbauende Arbeiten durchgeführt werden. In diesem Unterkapitel soll ein Ausblick gegeben werden, welcher Forschungsbedarf durch die gewonnenen Erkenntnisse aufgedeckt wurde. Diese werden den drei Bereichen *Einfluss der Anwenderkräfte auf weitere Bewertungsgrößen* (*Systemverständnis*), *Produktentwicklung*, *Normung* und *Testing* zugeordnet.

### **Analyse des Einflusses der Querkraft auf weitere relevante Bewertungsgrößen**

Anhand der durchgeführten Forschungsarbeit konnte aufgezeigt werden, dass die Kräfte des Anwenders den Hammerbohrprozess beeinflussen. Dies lässt den Schluss zu, dass diese Kräfte ebenso weitere relevante Bewertungsgrößen beeinflussen könnten. Bezüglich des Bohrhammers könnte dies der Verschleiß von Antriebstrangkomponenten sein. Ebenso könnten Größen im weiteren Umfeld des Hammerbohrers analysiert werden. Durch die Interaktion zwischen Bohrerwendel und der Bohrlochwand entstand ein erhöhter Verschleiß des Bohrers. Daraus kann die Hypothese geschlossen werden, dass die Bohrlochwand ebenfalls einen erhöhten Abrieb erfährt. Auf Basis dieser Hypothese lässt sich der Forschungsbedarf ableiten, den Einfluss der Anwenderkräfte auf die Größen Bohrlochgeometrie, dem Setzen von Betonschrauben, Betonankern sowie Dübeln und die Haltekräfte dieser Befestigungselemente zu untersuchen. Die dabei generierten Erkenntnisse können helfen die Gestalt von Befestigungselementen gegenüber dem Einfluss von Querkräften zu optimieren sowie mögliche Testverfahren für die Normung abzuleiten.

Weitere Untersuchungsgrößen sollten auch aus der Ergonomie berücksichtigt werden. Untersuchungen von Hecker (1983) haben gezeigt, dass der Bohrer einen Großteil des beim Bohren entstehenden Lärms verursacht. Weiter konnte nachgewiesen werden, dass im Bohrer Biegeschwingungen entstehen. Durch das Aufbringen von Querkräften resultiert ein neuer Spannungszustand, welcher einen positiven oder negativen Effekt auf die Schallabstrahlung am Bohrer haben könnte. Deshalb sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Querkräfte auf die

Geräuschemission des Bohrers haben. Neben Vibrationen und Lärm wird der Anwender beim Hammerbohren durch Staub belastet und langfristig auch geschädigt. Entsprechend der Lärmbelastung könnten auch hinsichtlich des Themas Staub der Einfluss der Anwenderkräfte auf die Staubentstehung bzw. -verteilung in der Luft untersucht werden. Ebenso könnte die Beanspruchung des Anwenders erforscht werden. Durch die manuellen Versuche aus dieser Arbeit mit Kraftmessfolien und Kraftmessplatte, kann die Belastung des Anwenders für unterschiedliche Faktoreinstellungen beschrieben werden. Diese können genutzt werden, um die Beanspruchung des Anwenders beim Hammerbohren zu analysieren. Für derartige Untersuchungen existieren bereits Simulationsumgebungen wie Anybody oder OpenSim. Hierbei gibt es im Power-Tool-Umfeld bereits erste Forschungsergebnisse (Chang, Chablat, Bennis & Ma, 2017).

Die genannten Untersuchungen können dazu beitragen Einflussgrößen aufzudecken und dadurch Potentiale für die Produktentwicklung zu identifizieren.

### **Produktentwicklung**

Die Erkenntnisse sowie generierten Daten können ebenso für Forschungsarbeiten genutzt werden, welche direkt in die Produktentwicklung von Bohrhämmern übergehen können. Wie im Stand der Forschung beschrieben gibt es diverse Untersuchungen (Gillmeister, 1997; Hecker & Riederer, 1985; Oddo et al., 2004) zur Erforschung von Konzepten zur Schwingungsentkopplung des Hauptgriffs in Bohrrichtung. Durch das Wissen in welche Raumrichtung Querkräfte auftreten und wie hoch diese sind, können in weiteren Untersuchungen Konzepte erforscht werden, welche die auftretenden Querkräfte berücksichtigen. Dadurch können Bohrhämmer so gestaltet werden, dass diese den Anwender besser schützen.

Ein weiterer Forschungsansatz kann im Bereich der Digitalisierung von Bohrhämmern gefunden werden. Auf Basis der sehr großen erzeugten Datenmenge in Kombination mit dem gewonnenen Verständnis welche Faktoren einen Einfluss auf den Hammerbohrprozess haben, können anhand von Machine Learning-Ansätzen Merkmale identifiziert sowie Vorhersagemodelle aufgebaut werden. Hierbei könnte beispielsweise das Ziel verfolgt werden, die Anwenderkräfte vorherzusagen und beim Auftreten von zu hohen  $a_{hv}$ -Werten oder zu niedriger Vorschubgeschwindigkeit eine Rückmeldung an den Anwender zu geben. Dies ermöglicht dem Anwender, die aufgebrauchten Kräfte gezielt anzupassen.

Wie die dargestellten Ansätze zeigen, können aus den Erkenntnissen dieser Arbeit direkte Potentiale für die Produktentwicklung von Bohrhämmern abgeleitet werden. Dadurch kann ein Mehrwert für den Anwender geschaffen werden.

## Normung

In Normen (bspw. DIN EN ISO 28927-10) zur Messung der  $a_{hy}$ -Werte wird beschrieben unter welchen Randbedingungen diese durchgeführten werden müssen. Hierbei werden beispielsweise die Andruckkraft, das Betongemisch oder die Körperhaltung vorgegeben. Werden im wissenschaftlichen Umfeld neue Erkenntnisse gewonnen, welche bislang nicht berücksichtigten Größen einen Einfluss haben, werden diese in Normungsgremien diskutiert und anschließend in geeigneter Form in die Norm mitaufgenommen. Durch den in der Arbeit nachgewiesenen Einfluss der Querkraft auf die Gehäuseschwingungen wird der Bedarf deutlich, dass die Querkraft als Randbedingung ebenfalls in die Norm DIN EN ISO 28927-10 mitaufgenommen werden sollte. Ob diese hierbei variiert oder lediglich konstant gehalten werden muss, sollte jedoch noch diskutiert werden.

## Entwicklung eines Hand-Arm-Modells zur Unterstützung des Testings von Bohrhämmern und Bohrern

In dieser Arbeit wurde das von Cronjäger et al. (1984) entwickelte Hand-Arm-Modell hinsichtlich der Belastung des Bohrhammers untersucht. Hierbei konnte aufgezeigt werden, dass die Kraftaufbringung an den beiden Griffanbindungen von zwei Faktoren abhängt. Diese sind die Schwingungsentkopplung des Hauptgriffs des Bohrhammers und in Querrichtung der Abstand zwischen vorderer und hinterer Anbindung sowie die Länge des Bohrers. Ein weiterer Nachteil des Hand-Arm-Modells ist, dass bei Bohrhämmern ohne Schwingungsentkopplung 50 % der Andruckkraft über die Seitengriffanbindung eingeleitet wird. Bei Bohrhämmern mit Schwingungsentkopplung beträgt die Andruckkraft an der Seitengriffanbindung mehr als 50 % der Gesamtkraft. Dies entspricht nicht der realen Anwendung. Es bedarf somit eines Lösungsansatzes zur Optimierung des Hand-Arm-Modells für die Belastung in Vorschub- und Querrichtung.

Das Ziel der Optimierung des Hand-Arm-Modells in Vorschubrichtung sollte ein für unterschiedliche Vorschubkräfte und Bohrrichtungen einstellbares Modell sein. Weiterhin sollte die Verteilung der Andruckkräfte auf beide Griffanbindungen dem manuellen Hammerbohren entsprechen. Durch die explorative Studie konnte das Wissen bezüglich des Verhältnisses der Kraftverteilung der Anbindungen aufgebaut werden. Dieses Wissen sollte durch Studien zur Untersuchung der Schwingungseigenschaften bei anwendungsspezifischen Körperhaltungen und Andruckkräften je Arm kombiniert werden, um ein einstellbares Hand-Arm-Modell entwerfen zu können. Eine Herausforderung bei der Einstellung der Kräfte an beiden Griffanbindungen entsteht durch die Parallelschaltung der Federpakete. Dadurch erfahren beide Federpakete immer den gleichen Weg, wodurch sich

automatisch ein Kraftverhältnis einstellt. Ein Lösungsansatz, um die Andruckkraft an der jeweiligen Anbindung einzustellen ohne die Schwingungseigenschaften zu verändern sind Federn mit konstanter Federsteifigkeit (Hao et al., 2017). Diese erlauben es, für eine bestimmte Auslenkung der Feder eine konstante Andruckkraft aufzubringen. Dadurch kann die Andruckkraft für beide Anbindungen entkoppelt aufgebracht werden.

Für die Optimierung des Hand-Arm-Modells bei Aufbringung einer Querkraft kann ebenfalls der Mechanismus mit einer konstanten Federsteifigkeit eingesetzt werden. Somit könnte die Querkraft gezielt für beide Anbindungen eingestellt werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht in einer Untersuchung der Schwingungseigenschaften des Anwenders bei der Belastung durch eine Querkraft. Um diese zu ermitteln sollten Impedanzmessungen durchgeführt werden. Hierfür könnten bestehende Untersuchungsmethoden (Lindenmann & Matthiesen, 2019; Matthiesen, Lindenmann & Bruchmueller; Matthiesen, Mangold & Bruchmueller, 2018) genutzt werden. Anschließend kann ein physisches Hand-Arm-Modell abgeleitet werden, welches die Schwingungscharakteristik sowie den Lösungsansatz zur gezielten Aufbringung einer Querkraft je Anbindung vereint.

Durch ein Hand-Arm-Modell, welches die Belastung des Bohrhammers in Vorschub- und Querrichtung realitätsnäher abbilden kann, können die Ergebnisse dieser Studie weiter abgesichert bzw. die Einflüsse der Anwenderkräfte auf Schwingungen am Hauptgriff besser untersucht werden.

# Literaturverzeichnis

- Aldien, Y., Marcotte, P., Rakheja, S. & Boileau, P.-E. (2006). Influence of hand–arm posture on biodynamic response of the human hand–arm exposed to z(h)-axis vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(1), 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.07.001>
- Aldien, Y., Marcotte, P., Rakheja, S. & Boileau, P.-E. (2005). Mechanical impedance and absorbed power of hand-arm under x(h)-axis vibration and role of hand forces and posture. *Industrial Health*, 43(3), 495–508. <https://doi.org/10.2486/indhealth.43.495>
- Anton, D., Shibley, L. D., Fethke, N. B., Hess, J., Cook, T. M. & Rosecrance, J. (2010). The effect of overhead drilling position on shoulder moment and electromyography. *Ergonomics*, 44(5), 489–501. <https://doi.org/10.1080/00140130120079>
- Antonov, M., Veinthal, R., Yung, D.-L., Katušin, D. & Hussainova, I. (2015). Mapping of impact-abrasive wear performance of WC–Co cemented carbides. *Wear*, 332-333, 971–978. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.031>
- Antonucci, A., Barr, A., Martin, B. & Rempel, D. (2017). Effect of bit wear on hammer drill handle vibration and productivity. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(8), 642–651. <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1316385>
- Besa, A. J., Valero, F. J., Suñer, J. L. & Carballeira, J. (2007). Characterisation of the mechanical impedance of the human hand–arm system. The influence of vibration direction, hand–arm posture and muscle tension. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37(3), 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2006.10.019>
- Blache, Y., Desmoulins, L., Allard, P., Plamondon, A. & Begon, M. (2015). Effects of height and load weight on shoulder muscle work during overhead lifting task. *Ergonomics*, 58(5), 748–761. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.980336>
- Botti, L., Martin, B., Barr, A., Kapellusch, J., Mora, C. & Rempel, D. (2020). R2: Drilling into concrete: Effect of feed force on handle vibration and productivity. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 80, 103049. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2020.103049>

- Botti, L., Mora, C., Antonucci, A., Carty, P., Barr, A. & Rempel, D. (2017). Carbide-tipped bit wear patterns and productivity with concrete drilling. *Wear*, 386-387, 58–62. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.05.017>
- Bovenzi, M. (1994). Hand-arm vibration syndrome and dose-response relation for vibration induced white finger among quarry drillers and stoneworkers. Italian Study Group on Physical Hazards in the Stone Industry. *Occupational and Environmental Medicine*, 51(9), 603–611. <https://doi.org/10.1136/oem.51.9.603>
- Bruchmueller, T., Huegel, N., Wacker, S. & Matthiesen, S. (2019). Modelling of Tool Workpiece Interactions—Coefficient of Restitution for Hammer Drilling of Concrete. *Forschung im Ingenieurwesen*, 83(1), 21–30. <https://doi.org/10.1007/s10010-018-00293-7>
- Bruchmüller, T. (2019). *Realitätsnahe und reproduzierbare Randbedingungen in der Vibrationsanalyse - Ein Ersatzuntergrund für elektropneumatische Bohrhämmer*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Burström, L. (1997). The influence of biodynamic factors on the mechanical impedance of the hand and arm. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 69(6), 437–446. <https://doi.org/10.1007/s004200050172>
- Burström, L. (1990). Measurements of the impedance of the hand and arm. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 62(6), 431–439. <https://doi.org/10.1007/BF00379059>
- Carreño-Morelli, E., Alveen, P., Moseley, S., Rodriguez-Arbaizar, M. & Cardoso, K. (2021). A comparative study of cemented carbide parts produced by solvent on granules 3D-printing (SG-3DP) versus press and sinter. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 97, 105515. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105515>
- Carty, P., Cooper, M. R., Barr, A., Neitzel, R. L., Balmes, J. & Rempel, D. (2017). The Effects of Bit Wear on Respirable Silica Dust, Noise and Productivity: A Hammer Drill Bench Study. *Annals of Work Exposures and Health*, 61(6), 700–710. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxx041>
- Chang, J., Chablat, D., Bennis, F. & Ma, L. (2017). Muscle Fatigue Analysis Using OpenSim. In V. G. Duffy (Hrsg.), *Digital Human Modeling. Applications in Health, Safety, Ergonomics, and Risk Management: Ergonomics and Design* (Lecture notes in computer science, Bd. 10286, S. 95–106). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-58463-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58463-8_9)

- Chiang, L. E. (2004). Dynamic Force–Penetration Curves in Rock by Matching Theoretical to Experimental Wave Propagation Response. *Experimental Mechanics*, 44(2), 167–175. <https://doi.org/10.1177/0014485104042449>
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, 112(1), 155–159. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.112.1.155>
- Concettoni, E. & Griffin, M. (2009). The apparent mass and mechanical impedance of the hand and the transmission of vibration to the fingers, hand, and arm. *Journal of Sound and Vibration*, 325(3), 664–678. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.03.033>
- Cronjäger, L. & Jahn, R. (1985). *Schwingungsbelastungen bei handgeführten Bohrwerkzeugen Techn. Prüfverfahren - Erarbeitung von technischen Prüfverfahren zur Bestimmung der Schwingungsbelastung beim Arbeiten mit handgeführten Bohrhämmern und Schlagbohrmaschinen* (Forschungsberichtsreihe Humanisierung des Arbeitslebens, Bd. 418). Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- Cronjäger, L., Jahn, R. & Riederer, H. (1984). *Entwicklung eines Versuchsstandes zur reproduzierbaren Messung der Vibration schlagender handgeführter Maschinen*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-87723-9>
- DIN 33402-2 (2005-12). *Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 33411-1 (1982-09). *Körperkräfte des Menschen - Teil 1: Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgrößen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 45677 (2001-01). *Mechanische Eingangsimpedanz des menschlichen Hand-Arm-Systems*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 45679 (2013-02). *Messung und Bewertung der Ankopplungskräfte zur Beurteilung der Schwingungsbelastung des Hand-Arm-Systems*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN CEN/TR 15350 (2013-12). *Mechanische Schwingungen – Anleitung zur Beurteilung der Belastung durch Hand-Arm-Schwingungen aus Angaben zu den benutzten Maschinen einschließlich Angaben von den Maschinenherstellern*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- DIN EN ISO 11148-13 (2015-04). *Handgehaltene nicht-elektrisch betriebene Maschinen - Sicherheitsanforderungen - Teil 13: Eintreibgeräte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 206 (2017-01). *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 28927-10 (2011-07). *Handgehaltene motorbetriebene Maschinen – Messverfahren zur Ermittlung der Schwingungsemission - Teil 10: Bohrhämmer, Schlaghämmer und Aufbruchhämmer*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 5349 (2001-12). *Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-11 (2017-01). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-210 (2011-01). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN IEC 60050-351 (2014-09). *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil\_351: Leittechnik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Dobry, M. W. & Barczewski, R. (1996). Integrated stand for vibration and ergonomic investigations of hand-held impact tools. *Central European Journal of Public Health*, 4(1), 59–64.
- Dong, R. G., Welcome, D. E., Xu, X. S., Warren, C., Mcdowell, T. W., Wu, J. Z. & Rakheja, S. (2012). Mechanical impedances distributed at the fingers and palm of the human hand in three orthogonal directions. *Journal of Sound and Vibration*, 331(5), 1191–1206. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.10.015>
- EPTA-European Power Tool Association. (2009). *Procedure 05: Measurement of the single impact energy of rotary hammers breakers*. Frankfurt.
- Ersoy, A. & Waller, M. D. (1995). Wear characteristics of PDC pin and hybrid core bits in rock drilling. *Wear*, 188(1-2), 150–165. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06646-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06646-2)

- ETAG 001-1 (1997-06). *Bekanntmachung der Leitlinie für die europäische technische Zulassung für Metalldübel zur Verankerung im Beton - Teil 1: Dübel - Allgemeines*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Färkkilä, M., Aatola, S., Starck, J., Korhonen, O. & Pyykkö, I. (1986). Hand-grip force in lumberjacks: two-year follow-up. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 58(3), 203–208. <https://doi.org/10.1007/BF00432102>
- Flegner, P., Kačur, J., Durdán, M., Laciak, M., Stehlíková, B. & Pástor, M. (2016). Significant damages of core diamond bits in the process of rocks drilling. *Engineering Failure Analysis*, 59, 354–365. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.10.016>
- Franca, L. F.P. (2011). A bit–rock interaction model for rotary–percussive drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(5), 827–835. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.05.007>
- Fraser, T. M. (1980). *Ergonomic principles in the design of hand tools* (Occupational safety and health series, Bd. 44, 1. publ). Geneva: International Labour Office.
- Fridén, J. (2001). Vibration damage to the hand: clinical presentation, prognosis and length and severity of vibration required. *Journal of Hand Surgery*, 26(5), 471–474. <https://doi.org/10.1054/jhsb.2001.0633>
- Gillmeister, F. (1997). Beispiele passiver und aktiver sekundärer Vibrationsminderungsmaßnahmen für Geräte mit unterschiedlichen Schwingungscharakteristiken. *VDI-Berichte 1345*, 1997, 335–342.
- Gillmeister, F. (1998). *Passive und aktive sekundäre Maßnahmen zur Reduzierung der Hand-Arm-Schwingungsbelastung*. Dissertation. Universität Dortmund, Dortmund.
- Goldsmith, P. C., Molina, F. A., Bunker, C. B., Terenghi, G., Leslie, T. A., Fowler, C. J., Polak, J. M. & Dowd, P. M. (1994). Cutaneous nerve fibre depletion in vibration white finger. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 87(7), 377–381.
- Golysheva, E.V., Babitsky, V.I. & Veprik, A.M. (2004). Vibration protection for an operator of a hand-held percussion machine. *Journal of Sound and Vibration*, 274(1-2), 351–367. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.05.019>

- Gruner, G. & Knoll, P. (2000). *Optimierung motorisch betriebener Handmaschinen (Schlagbohrmaschinen, Bohrhammer) und Werkzeuge hinsichtlich der Emmissionsminderung des Feinstaubes* (Forschungsbericht FB 893/2000, 893. Aufl.). Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- Gurram, R., Rakheja, S. & Gouw, G. J. (1995). Mechanical impedance of the human hand-arm system subject to sinusoidal and stochastic excitations. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 16(2), 135–145. [https://doi.org/10.1016/0169-8141\(94\)00092-H](https://doi.org/10.1016/0169-8141(94)00092-H)
- Gwosch, T., Dörr, M. & Matthiesen, S. (2021). Modeling of human-machine systems for system reliability testing: Investigation of the user impact on the load of the machine. *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP 2021)*, 1–10.
- Hamouda, K., Rakheja, S., Dewangan, K. N. & Marcotte, P. (2018). Fingers' vibration transmission and grip strength preservation performance of vibration reducing gloves. *Applied Ergonomics*, 66, 121–138. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.08.005>
- Hao, G., Mullins, J. & Cronin, K. (2017). Simplified modelling and development of a bi-directionally adjustable constant-force compliant gripper. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(11), 2110–2123. <https://doi.org/10.1177/0954406216628557>
- Hecker, R. (1983). *Stoss- und Schallprobleme beim schlagenden Bohren* (Reihe 11: Schwingungstechnik, Lärmbekämpfung, Bd. 52). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Hecker, R. & Riederer, H. (1985). *Reduzierung der Lärm- und Vibrationsbelastung beim Arbeiten mit elektrischen Bohr- und Schlaghämmern* (Humanisierung des Arbeitslebens, Forschungsbericht HA 85-009). Eggenstein-Leopoldshafen: Fachinformationszentrum Physik, Energie, und Mathematik GmbH.
- Hustrulid, W. A. & Fairhurst, C. (1971a). A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock part I - theory of percussive drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 8(4), 311–333. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(71\)90045-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(71)90045-3)
- Hustrulid, W. A. & Fairhurst, C. (1971b). A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock part II - force-penetration and specific energy

- determinations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 8(4), 335–356. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(71\)90046-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(71)90046-5)
- Hustrulid, W. A. & Fairhurst, C. (1972a). A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock part III - experimental verification of the mathematical theory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9(3), 417–429. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90006-X)
- Hustrulid, W. A. & Fairhurst, C. (1972b). A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock part IV - application of the model to actual percussion drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9(3), 431–442. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90007-1)
- ISO 10068 (2012-12). *Mechanical vibration and shock - Mechanical impedance of the human hand arm system at the driving point*. Genf: ISO copyright office.
- Jahn, R. & Hesse, M. (1986). Applications of hand-arm models in the investigation of the interaction between man and machine. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 12(4), 343–346. <https://doi.org/10.5271/sjweh.2132>
- Jahn, R. (1985). *Einflußgrößen auf die Beschleunigungen elektropneumatischer Bohrhämmer*. Dissertation. Universität Dortmund, Dortmund.
- Jens Burgert. (2020). *On direct and inverse problems related to longitudinal impact of non-uniform elastic rods*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Johannsen, G. (1993). *Mensch-Maschine-Systeme* (Springer-Lehrbuch). Berlin: Springer.
- Johannsen, G., Boller, H. E., Donges, E. & Stein, W. (1977). *Der Mensch im Regelkreis. Lineare Modelle* (Methoden der Regelungstechnik, 1. Aufl.). München, Wien: Oldenbourg.
- Kalra, M., Rakheja, S., Marcotte, P., Dewangan, K. N. & Adewusi, S. (2015). Measurement of coupling forces at the power tool handle-hand interface. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 50(3), 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.09.013>

- Kaulbars, U. (2006). Schwingungen fest im Griff. Neues System zur Messung von Ankopplungskräften. *Technische Überwachung*, 47(6), 35–40.
- Kaulbars, U. & Lemerle, P. (2007). Messung der Ankopplungskräfte zur Beurteilung der Hand-Arm-Schwingungen. Weiterentwicklung eines Messsystems. *VDI-Berichte*, (2002), 99–111, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Kern, T. A. (Hrsg.). (2009). *Entwicklung haptischer Geräte. Ein Einstieg für Ingenieure*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-87644-1>
- Kinne, J. & Melzig-Thiel, R. (1992). Mechanical Models of the Hand-arm System for Testing Hand-held Tools. In diverse & HVBG Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (Hrsg.), *6th International Conference on Hand-Arm Vibration* (S. 577–582). Essen: Druckzentrum Sutter & Partner GmbH.
- Kinne, J., Schenk, T. & Knoll, P. (1997). Automatischer Prüfstand für die Messung der Schwingungsemission von Handmaschinen. *VDI Berichte*, (1345), 49–56, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Kivade, S. B., Murthy, C. S.N. & Vardhan, H. (2015). Experimental Investigations on Penetration Rate of Percussive Drill. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.012>
- Krajnak, K., Riley, D. A., Wu, J., McDowell, T., Welcome, D. E., Xu, X. S. & Dong, R. G. (2012). Frequency-dependent effects of vibration on physiological systems: experiments with animals and other human surrogates. *Industrial Health*, 50(5), 343–353. <https://doi.org/10.2486/indhealth.MS1378>
- Lage Burström. (1997). The influence of biodynamic factors on the mechanical impedance of the hand and arm. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 69, 437–446.
- Lindenmann, A., Uhl, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2021). The influence of human interaction on the vibration of hand-held human-machine systems – The effect of body posture, feed force, and gripping forces on the vibration of hammer drills. *Applied Ergonomics*, 95(1), 103430. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103430>
- Lindenmann, A. & Matthiesen, S. (2019). The Rotational Mechanical Impedance of the Hand-Arm System. A Preliminary Study. In Institut für Arbeitsschutz der

- Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) (Hrsg.), *14th International Conference on Hand Arm Vibration. -Abstracts-* (Bd. 14, S. 75–76). Berlin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV).
- Looze, M. P. de, Urlings, I.J.M., Vink, P., van Rhijn, J. W., Miedema, M. C., Bronkhorst, R. E. & van der Grinten, M. P. (2001). Towards successful physical stress reducing products. An evaluation of seven cases. *Applied Ergonomics*, 32(5), 525–534. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(01\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(01)00018-7)
- Lundberg, B. & Collet, P. (2010). Optimal wave with respect to efficiency in percussive drilling with integral drill steel. *International Journal of Impact Engineering*, 37(8), 901–906. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.02.001>
- Lundberg, B. & Okrouhlik, M. (2006). Efficiency of a percussive rock drilling process with consideration of wave energy radiation into the rock. *International Journal of Impact Engineering*, 32(10), 1573–1583. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.02.001>
- Mangold, S. (2019). *Erfassung heterogener passiver Anwendereigenschaften und deren Abbildung in einem einstellbaren Hand-Arm Modell am Beispiel eines Impulsschraubers*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Marcotte, P., Aldien, Y., Boileau, P.-É., Rakheja, S. & Boutin, J. (2005). Effect of handle size and hand–handle contact force on the biodynamic response of the hand–arm system under zh-axis vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 283(3-5), 1071–1091. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.06.007>
- Marcotte, P., Boutin, J. & Jasinski, J. (2010). Development of a hand–arm mechanical analogue for evaluating chipping hammer vibration emission values. *Journal of Sound and Vibration*, 329(10), 1968–1980. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.10.042>
- Matthiesen, S., Lindenmann, A. & Bruchmueller, T. Anforderungen an ein Messsystem zur Ermittlung der Rotationsimpedanz von Hand-Arm Systemen. In *diverse, VDI Produkt- und Prozessgestaltung (Hg.) 2018 – 7. VDI-Tagung Humanschwingungen 2018, Würzburg* (Bd. 2322, S. 91–106).
- Matthiesen, S., Mangold, S. & Bruchmueller, T. (2018). The influence of varying passive user interactions on power tools in the context of product development. *Forschung im Ingenieurwesen*, 329(10), 157–168. <https://doi.org/10.1007/s10010-018-0269-x>

- Matthiesen, S., Mangold, S., Germann, R., Schäfer, T. & Schmidt, S. (2018). Hand-arm models for supporting the early validation process within the product development of single impulse operating power tools. *Forschung im Ingenieurwesen*, 82(2), 119–129. <https://doi.org/10.1007/s10010-018-0265-1>
- Matthiesen, S., Behrendt, M., Gwosch, T., Bruchmueller, T. & Schaefer, T. (2018). *IPEK-XiL-Ansatz und IPEK-XiL-Framework für Power-Tools* (Institut für Produktentwicklung (IPEK), Hrsg.). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000080086>
- Matthiesen, S., Mangold, S., Bruchmüller, T. & Marko, A.-M. (2014). Der Mensch als zentrales Teilsystem in Wechselwirkung mit handgehaltenen Geräten – Ein problemorientierter Ansatz zur Untersuchung dieser Schnittstelle. In D. Krause, K. Paetzhold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 25. DfX-Symposium, Oktober 2014* (Bd. 25, S. 193–204). Hamburg: TuTech-Verlag.
- Matthiesen, S. & Uhl, M. (2017). Methodical Approach for the Analysis of the Active User Behavior during the Usage of Power Tools. In D. Krause, K. Paetzhold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 28. DfX-Symposium Oktober 2017* (Bd. 28, S. 1–12). Hamburg: TuTech Verlag.
- MauerbohrerMBI:2002-01 (Bekanntmachung) (2002). *Merkblatt über die Kennwerte, Anforderungen und Prüfungen von Maurerbohrern mit Schneidkörpern aus Hartmetall, die zur Herstellung der Bohrlöcher von Dübelverankerung verwendet werden*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Mital, A., Bishu, R. R. & Manjunath, S. G. (1991). Review and evaluation of techniques for determining fatigue allowances. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 8(2), 165–178. [https://doi.org/10.1016/0169-8141\(91\)90017-G](https://doi.org/10.1016/0169-8141(91)90017-G)
- Momeni, S., Moseley, S., Ante, M. & Allaart, J. (2017). The wear of WC-Co drill bits during rotary-percussive drilling of reinforced concrete. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 62, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.08.006>
- Moseley, S. G., Peters, C. & Momeni, S. (2020). Near-surface phenomena occurring in cemented carbides with different binders during rotary-percussive drilling of reinforced concrete: FE simulation and microstructural investigations. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 86, 105115. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105115>

- Oddo, R., Loyau, T., Boileau, P. E. & Champoux, Y. (2004). Design of a suspended handle to attenuate rock drill hand-arm vibration. Model development and validation. *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5), 623–640. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.06.006>
- Pang, S. S. & Goldsmith, W. (1992). Model of a pneumatic jackhammer system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 29(4), 242. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)90809-E](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)90809-E)
- Poole, C. J. M., Bovenzi, M., Nilsson, T., Lawson, I. J., House, R., Thompson, A. & Youakim, S. (2019). International consensus criteria for diagnosing and staging hand-arm vibration syndrome. *Int. Arch Occup Environ Health (International Archives of Occupational and Environmental Health)*, 92(1), 117–127. <https://doi.org/10.1007/s00420-018-1359-7>
- Rakheja, S., Wu, J. Z., Dong, R. G., Schopper, A. W. & Boileau, P.-É. (2002). A comparison of biodynamic models of the human hand arm system for applications to hand-held power tools. *Journal of Sound and Vibration*, 249(1), 55–82. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3831>
- Rempel, D., Antonucci, A., Barr, A., Cooper, M. R., Martin, B. & Neitzel, R. L. (2019). Pneumatic rock drill vs. electric rotary hammer drill: Productivity, vibration, dust, and noise when drilling into concrete. *Applied Ergonomics*, 74, 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.005>
- Rempel, D., Antonucci, A., Barr, A. & Martin, B. (2017). Construction Ergonomics: Concrete Bit Wear Increases Handle Vibration and Drilling Time. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 61(1), 969–972. <https://doi.org/10.1177/1541931213601724>
- Rempel, D., Barr, A. & Antonucci, A. (2017). A New Test Bench System for Hammer Drills: Validation for Handle Vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 62, 17–20. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.08.001>
- Rempel, D., Barr, A. & Cooper, M. R. (2019). Effect of hollow bit local exhaust ventilation on respirable quartz dust concentrations during concrete drilling. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 16(5), 336–340. <https://doi.org/10.1080/15459624.2019.1587171>
- Riederer, H. (1985). *Untersuchungen zur Dynamik elektropneumatischer Bohrhämmer*. Dissertation. Universität Dortmund, Dortmund.

- Rohmert, W. (1960a). Ermittlung von Erholungspausen für statische Arbeit des Menschen. *Internationale Zeitschrift für Angewandte Physiologie Einschliesslich Arbeitsphysiologie*, 18(2), 123–164.  
<https://doi.org/10.1007/BF00698869>
- Rohmert, W. (1960b). *Statische Haltearbeit des Menschen*. Frankfurt am Main: Beuth Verlag GmbH.
- Rohmert, W. (1973a). Problems in determining rest allowances. *Applied Ergonomics*, 4(2), 91–95. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(73\)90082-3](https://doi.org/10.1016/0003-6870(73)90082-3)
- Rohmert, W. (1973b). Problems of determination of rest allowances Part 2: Determining rest allowances in different human tasks. *Applied Ergonomics*, 4(3), 158–162. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(73\)90166-X](https://doi.org/10.1016/0003-6870(73)90166-X)
- Saai, A., Bjørge, R., Dahl, F., Antonov, M., Kane, A., Diop, J.-B. & Ojala, N. (2020). Adaptation of Laboratory tests for the assessment of wear resistance of drill-bit inserts for rotary-percussive drilling of hard rocks. *Wear*, 456-457, 203366.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203366>
- Schäfer, T. (2018). *Ein gesamtsystemischer Ansatz zur simulationsgestützten Analyse und Optimierung eines Bohrhammerschlagwerkes*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Schaub, K., Wakula, J., Berg, K., Kaiser, B., Bruder, R., Glitsch, U. & Ellegast, R.-P. (2015). The Assembly Specific Force Atlas. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 25(3), 329–339.  
<https://doi.org/10.1002/hfm.20545>
- Schenk, P. & Knoll, P. (1998). *Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Prüfstandsmessungen an handgehaltenen motorisch angetriebenen Geräten zur Beurteilung von Schwingungsbelastungen* (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschungsbericht, Fb 795). Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH Wirtschaftsverlag NW.
- Schenk, T. & Gillmeister, F. (1999). *Ermittlung der Meßunsicherheit bei der Anwendung von Prüfverfahren für die Schwingungsemission von handgehaltenen vibrierenden Maschinen*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH.

- Schenk, T. (1997). *Schwingungsminderung - Bohrwerkzeuge. Verminderung der Schwingungsbelastung des Hand-Arm-Systems durch Optimierung von Hammerbohrwerkzeugen* (Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse: Forschungsergebnisse für die Praxis, Bd. 104, 1. Aufl.). Dortmund: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- Schenk, T. (2000). *Schwingungsminderung - Einsatz von Prüfständen. Automatisierte Messung der Schwingungsemission von Handmaschinen* (Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse: Forschungsergebnisse für die Praxis, Bd. 118). Dortmund: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- Schröder, T., Lindenmann, A., Hehmann, S., Uhl, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2020). A Method of Determining the Separation Plane of a Knob-Shaped Measuring Handle for the Measurement of Hand-Arm-Impedances. In *Humanschwingungen 2020* (S. 131–140). VDI-Verlag GmbH.  
<https://doi.org/10.51202/9783181023709-131>
- Schweizer, A. (2020a). *Formfaktor K über Formkennwert Kf*. Zugriff am 10.04.2021. Verfügbar unter: [https://www.schweizer-fn.de/lagerung/lagerdaten/kfaktor\\_dia.png](https://www.schweizer-fn.de/lagerung/lagerdaten/kfaktor_dia.png)
- Schweizer, A. (2020b). *Schubmodul G über Shorehärte*. Zugriff am 10.04.2021. Verfügbar unter: [https://www.schweizer-fn.de/lagerung/lagerdaten/gmodul\\_dia.png](https://www.schweizer-fn.de/lagerung/lagerdaten/gmodul_dia.png)
- Tarabini, M., Saggini, B., Scaccabarozzi, D. & Moschioni, G. (2013). Hand-arm mechanical impedance in presence of unknown vibration direction. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 43(1), 52–61.  
<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.10.005>
- Tillmann, W. (1997). Hartmetalle im Bauwesen. Anwendung in Bohrwerkzeugen. In R. Ruthardt (Hrsg.), *Hartstoffe, Hartstoffschichten, Werkzeuge, Verschleißschutz: [Vorträge und Ausstellerbeiträge des Hagener Symposiums Pulvermetallurgie veranstaltet am 13. und 14. November 1997 vom Gemeinschaftsausschuß Pulver]* (Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Bd. 13, S. 265–281). Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft.
- Uhl, M., Gauch, M., Robens, J. H., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2022). Analysis of Drill Bit Wear and its Influence on Productivity and Vibrations in Interaction with Feed and Lateral Force. *International Journal of Industrial Ergonomics*. Manuskript im Druck.

- Uhl, M., Bruchmüller, T. & Matthiesen, S. (2019). Experimental analysis of user forces by test bench and manual hammer drill experiments with regard to vibrations and productivity. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 72, 398–407. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.06.016>
- Uhl, M., Lindenmann, A. & Matthiesen, S. (2021). Analysis of factors influencing the productivity of hammer drilling – user forces, human fatigue, drilling direction, and drill bit. *Applied Ergonomics*, 92, 103338. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103338>
- Uhl, M., Robens, J. H., Gauch, M., Germann, R. & Matthiesen, S. 2022. *Factors on Vibrational Harm during Hammer Drilling : Influences of Lateral Force, Feed Force, Hammer Drill and Drill Bit Type*. <https://doi.org/10.5445/IR/1000148106>
- Uhl, M., Robens, J. H., Gauch, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. 2022. *Does the User Behavior effect the Productivity of Hammer Drilling? : Analysis of the Influences of Feed and Lateral Force*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000148105>
- Vonnemann, G. (1977). *Energetische Betrachtungen zum schlagenden Bohren in Beton*. Dissertation. Universität Dortmund, Dortmund.
- Wakula, J., Berg, K., Schaub, K. & Bruder, R. (Hrsg.). (2009). *Der montagespezifische Kraftatlas* (BGIA-Report, 2009,3). Sankt Augustin: BGIA; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek.
- Weinert, K., Gillmeister, F. & Michel, O. (1994). *Schneidengestalt und Leistung von Hammerbohrwerkzeugen*. Walluf: Bauverlag GmbH.
- Weinert, K., Michel, O. & Gillmeister, F. (1993). *A Contribution to Optimize the Cutting Edge Angle of Hammer Drill* (Production Engineering - Research and Development in Germany 1, Bd. 1). München: Carl-Hanser Verlag.
- Xuefeng, T. & Shifeng, T. (1994). The wear mechanisms of impregnated diamond bits. *Wear*, 177(1), 81–91. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90120-1)
- Zimmerman, J., Bain, J., Persson, M. & Riley, D. (2017). Effects of power tool vibration on peripheral nerve endings. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 62, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.08.012>

# Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Definition</b>
<b>Andruckkraft</b>	„Die Andruckkraft ist die Kraft, die von der Bedienungsperson je Hand ausgehend auf die Maschine wirkt und nicht innerhalb der Ankopplungsfläche der Hand kompensiert wird.“ (DIN 45679)
<b>Anwender</b>	Bedienperson eines Power-Tools. (DIN EN ISO 5349)
<b>Hand-Arm-Modell</b>	Schwingungsmodelle eines Hand-Arm Systems. (DIN 45677)
<b>Hand-Arm-System</b>	Ein schwingungsbelastetes Teilsystem des Menschen, bestehend aus der Hand und dem Arm. (Bruchmüller, 2019)
<b>Manuelle Versuche</b>	Manuelle Versuche sind im Kontext handgehaltener oder handgeführter Maschinen mit der Hand ausgeführte Versuche mit einer handgehaltenen oder handgeführten Maschine
<b>Power-Tool</b>	Power-Tools umfassen handgehaltene oder handgeführte Maschinen Power-Tools umfassen elektrisch angetriebene Maschinen und nicht elektrisch betriebene Maschinen (DIN EN ISO 11148-13)
<b>Querkraft</b>	Die Querkraft ist diejenige Kraft, die die Maschine senkrecht zur Vorschubkraft auf das Werkstück ausübt.
<b>Vorschubkraft</b>	Die Vorschubkraft ist diejenige Kraft, die die Maschine in Vorschubrichtung auf das Werkstück ausübt. (angepasst aus DIN 45679)



# Anhang A

## Explorative Studie - Hauptstudie

Die folgenden Tabellen stammen aus der Veröffentlichung:

*“The Influence of Human Interaction on the Vibration of Hand-Held Human-Machine Systems - The Effect of Body Posture, Feed Force, and Gripping Forces on the Vibration of Hammer Drills” (Lindenmann et al., 2021)*

Tabelle A.2: Mann-Whitney-U-Test zur Analyse des Einflusses der Körperhaltung auf den  $a_{HV}$ -Wert am Hauptgriff und Seitengriff für drei vorgegebenen Vorschubkräfte

Mann-Whitney-U-Test	100 N			150 N			200 N		
	$p$	$U$	$r$	$p$	$U$	$r$	$p$	$U$	$r$
$a_{HV}$ Hauptgriff	.178	398	-	.211	347	-	.02	348	.29
$a_{HV}$ Seitengriff	.028	656	.28	.038	565	.27	.453	582	-

Basis: \* $p < .05$ , \*\* $p < .001$

Tabelle A.1: Einfluss der Vorschubkraft auf den  $a_{HV}$ -Wert am Haupt- und Seitengriff für beide Bohrrichtungen auf Basis des Kruskal-Wallis-Tests mit anschließendem Dunn Bonferroni Post-hoc-Test

	$a_{HV}$	Kruskal-Wallis	100 N -> 150 N		150 N -> 200 N		100 N -> 200 N	
			$p$	$z$	$p$	$z$	$p$	$z$
horizontal	HG	$\chi^2(2) = 6.83^*$	.633	1.251	.473	1.413	.027	2.613
	SG	$\chi^2(2) = 56.7^{**}$	< .001	3.601	< .001	4.069	< .001	7.525
vertikal	HG	$\chi^2(2) = 20.46^{**}$	.692	1.199	.010	2.931	< .001	4.397
	SG	$\chi^2(2) = 63^{**}$	.010	2.934	< .001	4.446	< .001	7.874

Basis: \* $p < .05$ , \*\* $p < .001$

## Anhang B

### Kausale Studie I - Produktivität

Die folgenden Tabellen stammen aus der Veröffentlichung:

*„Does the User Behavior effect the Productivity of Hammer Drilling? – Analysis of the Influences of Feed and Lateral Force” (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2022)*

Tabelle B. 1: Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests und Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Tests der Vorschubkraft (FF) auf die z-transformierte Vorschubgeschwindigkeit.

		Kruskal-Wallis Teststatistik								
		Ho2c (n=380)		He4c (n=384)		Bo He2c (n=191)		Hi He2c (n=192)		
		df	$\chi^2$	p	df	$\chi^2$	p	df	$\chi^2$	p
		5	162,083	<0,01	5	179,262	<0,01	5	155,335	<0,01
		5	162,083	<0,01	5	179,262	<0,01	5	155,335	<0,01
Mehrfachvergleich										
FF <sub>1</sub> [N]	FF <sub>2</sub> [N]	z	r	z	r	z	r	z	r	
80	110	-5,913***	0,53	-4,209***	0,37	-4,920***	0,62	-5,509***	0,69	
140	140	-7,727***	0,69	-5,890***	0,52	-5,167***	0,65	-6,867***	0,86	
170	170	-8,954***	0,80	-6,367***	0,56	-6,607***	0,83	-5,999***	0,75	
200	200	-9,801***	0,87	-7,344***	0,65	-6,008***	0,75	-3,732**	0,47	
230	230	-11,381***	1,01	-7,475***	0,66	-4,836***	0,61	-3,914**	0,49	
110	140	-1,844	0,16	-1,681	0,15	-0,246	0,03	-1,359	0,17	
170	170	-3,076*	0,27	-2,158	0,19	-1,687	0,21	-0,490	0,06	
200	200	-3,904**	0,35	-3,134*	0,28	-1,088	0,14	1,777	0,22	
230	230	-5,513***	0,49	-3,266*	0,29	0,045	0,01	1,595	0,20	
140	170	-1,227	0,11	-0,477	0,04	-1,440	0,18	0,868	0,11	
200	200	-2,044	0,18	-1,453	0,13	-0,841	0,11	3,316*	0,42	
230	230	-3,654***	0,33	-1,585	0,14	0,290	0,04	2,953*	0,37	
170	200	-0,812	0,07	-0,976	0,09	0,599	0,08	2,267	0,28	
230	230	-2,427	0,22	-1,108	0,10	1,719	0,22	2,085	0,26	
200	230	-1,624	0,14	-0,131	0,01	1,124	0,14	-0,182	0,02	

Note: Basis: n=1147, Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test, \*p<0,05, \*\*p<0,01, \*\*\*p<0,001

## **Kausale Studie I - Vibrationen**

Die folgenden Tabellen und Abbildungen stammen aus der Veröffentlichung:

*„Factors on Vibrational Harm during Hammer Drilling – Influences of Lateral Force, Feed Force, Hammer Drill and Drill Bit Type”* (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2022)

Tabelle B.2: Analyse des Einflusses der Vorschubkraft auf den  $a_{HV}$ -Wert am Gehäuse und am Hauptgriff der TE 30 für jeden Bohrentyp (Ho2c = Hohlbohrer, He4c = Wendelbohrer mit 4 Schneiden und He2c = Wendelbohrer mit 2 Schneiden)

		$a_{HV}$ Gehäuse						$a_{HV}$ Hauptgriff									
		Ho2c (n=192)		He4c (n=192)		He2c (n=192)		Ho2c (n=192)		He4c (n=192)		He2c (n=192)					
df	$\chi^2$	p	df	$\chi^2$	p	df	$\chi^2$	p	df	$\chi^2$	p	df	$\chi^2$	p			
5	39,089	<.001	5	3,014	0,698	5	13,608	.018	5	17,899	.003	5	9,386	.095	5	15,348	.009
<i>Mehrfachvergleich</i>																	
FF [N]	FF [N]	z	r	z	r	z	r	z	r	z	r	z	r	z	r	z	r
110	-4,182***	0,3	n. s.	n. s.	-1,167	n. s.	-2,906#	0,21	n. s.	-0,702	n. s.	-0,702	n. s.				
140	-5,216***	0,38	n. s.	n. s.	-0,358	n. s.	-3,484**	0,25	n. s.	-1,298	n. s.	-1,298	n. s.				
80	-5,444***	0,39	n. s.	n. s.	-1,568	n. s.	-3,610**	0,26	n. s.	-3,302*	0,24	-3,302*	0,24				
200	-4,182***	0,3	n. s.	n. s.	-1,667	n. s.	-3,082*	0,22	n. s.	-2,501	n. s.	-2,501	n. s.				
230	-3,507**	0,25	n. s.	n. s.	-1,233	n. s.	-2,344	n. s.	n. s.	-2,346	n. s.	-2,346	n. s.				
140	-0,999	n. s.	n. s.	n. s.	-0,810	n. s.	-0,578	n. s.	n. s.	-0,596	n. s.	-0,596	n. s.				
170	-1,226	n. s.	n. s.	n. s.	-2,735#	0,2	-0,704	n. s.	n. s.	-2,600	n. s.	-2,600	n. s.				
110	-0,036	n. s.	n. s.	n. s.	-2,834#	0,2	-0,175	n. s.	n. s.	-1,800	n. s.	-1,800	n. s.				
200	-0,711	n. s.	n. s.	n. s.	-2,400	n. s.	-0,562	n. s.	n. s.	-1,644	n. s.	-1,644	n. s.				
230	-0,711	n. s.	n. s.	n. s.	-1,926	n. s.	-0,126	n. s.	n. s.	-2,004	n. s.	-2,004	n. s.				
170	-0,820	n. s.	n. s.	n. s.	-2,024	n. s.	-0,403	n. s.	n. s.	-1,203	n. s.	-1,203	n. s.				
140	-1,035	n. s.	n. s.	n. s.	-1,590	n. s.	-1,140	n. s.	n. s.	-0,295	n. s.	-0,295	n. s.				
230	-1,710	n. s.	n. s.	n. s.	-0,099	n. s.	-0,529	n. s.	n. s.	-0,801	n. s.	-0,801	n. s.				
200	-1,262	n. s.	n. s.	n. s.	-0,335	n. s.	-1,266	n. s.	n. s.	-0,956	n. s.	-0,956	n. s.				
170	-1,937	n. s.	n. s.	n. s.	-0,434	n. s.	-0,738	n. s.	n. s.	-0,155	n. s.	-0,155	n. s.				
200	-0,675	n. s.	n. s.	n. s.													

Basis: n=1152, Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test, #p<0,1, \*p<0,05, \*\*p<0,01, \*\*\*p<0,001

Tabelle B.3: Analyse des Einflusses der Vorschubkraft auf den  $a_{HV}$ -Wert am Gehäuse und am Hauptgriff der GBH 3-28 für jeden Bohertyp (Ho2c = Hohlbohrer, He4c = Wendelbohrer mit 4 Schneiden und He2c = Wendelbohrer mit 2 Schneiden)

		a <sub>HV</sub> Gehäuse						a <sub>HV</sub> Hauptgriff									
		Ho2c (n=191)		He4c (n=192)		He2c (n=192)		Ho2c (n=191)		He4c (n=192)		He2c (n=192)					
df	X <sup>2</sup>	p	df	X <sup>2</sup>	p	df	X <sup>2</sup>	p	df	X <sup>2</sup>	p	df	X <sup>2</sup>	p			
5	89,771	<.001	5	60,893	<.001	5	48,855	<.001	5	10,741	.057	5	9,126	.104	5	30,106	<.001
<b>Mehrfachvergleich</b>																	
FF [N]	FF [N]	Z	r	Z	r	Z	r	Z	r	Z	r	Z	r	Z	r	Z	r
110	140	-1,558	n. s.	-0,362	n. s.	-0,490	n. s.	-2,283	n. s.	-2,765 <sup>#</sup>	0,2						
140	170	-2,702	n. s.	-2,243	n. s.	-2,310	n. s.	-3,606 <sup>**</sup>	0,26								
80	170	<b>-3,860<sup>**</sup></b>	0,28	<b>-3,806<sup>**</sup></b>	0,27	-2,099	n. s.	-0,947	n. s.								
200	200	<b>-6,580<sup>**</sup></b>	0,48	<b>-5,048<sup>**</sup></b>	0,36	<b>-4,049<sup>**</sup></b>	0,29	-0,922	n. s.								
230	230	<b>-7,828<sup>**</sup></b>	0,57	<b>-6,019<sup>**</sup></b>	0,43	-5,898	n. s.	-0,481	n. s.								
140	140	-1,153	n. s.	-1,881	n. s.	-1,820	n. s.	-1,323	n. s.								
170	170	-2,320	n. s.	<b>-3,444<sup>**</sup></b>	0,25	-1,608	n. s.	-1,336	n. s.								
110	200	<b>-5,063<sup>**</sup></b>	0,37	<b>-4,686<sup>**</sup></b>	0,34	<b>-3,559<sup>**</sup></b>	0,26	-1,336	n. s.								
230	230	<b>-6,320<sup>**</sup></b>	0,46	<b>-5,657<sup>**</sup></b>	0,41	<b>-5,408<sup>**</sup></b>	0,39	-3,205 <sup>*</sup>	0,23								
170	170	-1,167	n. s.	-1,563	n. s.	-0,211	n. s.	-0,841	n. s.								
140	200	<b>-3,910<sup>**</sup></b>	0,28	<b>-2,805<sup>#</sup></b>	0,2	-1,739	n. s.	-1,818	n. s.								
230	230	<b>-5,167<sup>**</sup></b>	0,37	<b>-3,777<sup>**</sup></b>	0,27	<b>-3,588<sup>**</sup></b>	0,26	<b>-3,687<sup>**</sup></b>	0,27								
170	200	<b>-2,743<sup>#</sup></b>	0,20	-1,242	n. s.	-1,950	n. s.	-2,659	n. s.								
230	230	<b>-4,000<sup>**</sup></b>	0,29	-2,213	n. s.	<b>-3,799<sup>**</sup></b>	0,27	<b>-4,528<sup>**</sup></b>	0,33								
200	230	-1,257	n. s.	-0,972	n. s.	-1,849	n. s.	-1,869	n. s.								

Basis: n=1152, Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test, <sup>#</sup>p<0,1, \*p<0,05, \*\*p<0,01, \*\*\*p<0,001

Tabelle B.4: Analyse des Einflusses der Querkraft auf den  $a_{HV}$ -Wert am Gehäuse und am Hauptgriff des TE 30 für jeden Bohrertyp (Ho2c = Hohlbohrer, He4c = Wendelbohrer mit 4 Schneiden und He2c = Wendelbohrer mit 2 Schneiden)

		Kruskal-Wallis Teststatistik															
		$a_{HV}$ Gehäuse				$a_{HV}$ Hauptgriff											
LF	N	Ho2c (n=192)		He4c (n=192)		He2c (n=192)		Ho2c (n=192)		He4c (n=192)		He2c (n=192)					
		$\chi^2$	p	$\chi^2$	p	$\chi^2$	p	$\chi^2$	p	$\chi^2$	p	$\chi^2$	p				
3	4	13,25	.004	98,851	<.001	1,754	.625	3	138,09	0	<.001	3	47,485	<.001	3	11,14	.011
Mehrfachvergleich																	
LF	N	LF	N	r	z	r	z	r	z	r	z	r	z	r	z	r	z
20	40	20	40	<b>-3,611**</b>	0,26	-1,098	n. s.	n. s.	n. s.	<b>-4,261***</b>	0,31	-0,279	n. s.	-0,327	n. s.	-2,007	n. s.
0	40	0	40	-1,745	n. s.	<b>-7,291***</b>	0,53	n. s.	n. s.	<b>-9,001***</b>	0,65	<b>-4,044***</b>	0,29	-2,007	n. s.	-2,007	n. s.
60	60	60	60	-2,160	n. s.	<b>-7,765***</b>	0,56	n. s.	n. s.	<b>-10,585***</b>	0,77	<b>-5,690***</b>	0,41	<b>-2,860*</b>	0,21	<b>-2,860*</b>	0,21
20	40	20	40	-1,866	n. s.	<b>-6,193***</b>	0,45	n. s.	n. s.	<b>-4,740***</b>	0,34	<b>-3,765***</b>	0,27	-1,681	n. s.	-1,681	n. s.
60	60	60	60	-1,415	n. s.	<b>-6,667***</b>	0,48	n. s.	n. s.	<b>-6,324***</b>	0,46	<b>-5,411***</b>	0,39	-2,533	n. s.	-2,533	n. s.
40	60	40	60	-0,415	n. s.	-0,474	n. s.	n. s.	n. s.	-1,583	n. s.	-1,646	n. s.	-0,852	n. s.	-0,852	n. s.

Basis: n=1152, Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test, #p<0,1, \*p<0,05, \*\*p<0,01, \*\*\*p<0,001

Tabelle B.5: Analyse des Einflusses der Querkraft auf den  $a_{wv}$ -Wert am Gehäuse und am Hauptgriff des GBH 3-28 für jeden Bohertyp (Ho2c = Hohlbohrer, He4c = Wendelbohrer mit 4 Schneiden und He2c = Wendelbohrer mit 2 Schneiden)

		Kruskal-Wallis Teststatistik															
		$a_{wv}$ Gehäuse			$a_{wv}$ Hauptgriff												
df	$X^2$	p	df	$X^2$	p	df	$X^2$	p	df	$X^2$	p						
												Ho2c (n=191)	He4c (n=192)	He2c (n=192)	Ho2c (n=191)	He4c (n=192)	He2c (n=192)
3	4.783	.188	3	81.999	<.001	3	46.927	<.001	3	122.625	<.001	3	125.069	<.001	3	47.303	<.001
<i>Mehrfachvergleich</i>																	
LF [N]	LF [N]	r	z	r	z	r	z	r	z	r	z	r	z	r	z	r	z
20	n. s.	n. s.	-0.997	n. s.	-0.962	n. s.	<b>-5.927***</b>	0.43	<b>-4.257***</b>	0.31	<b>-4.116***</b>	0.30					
0	40	n. s.	-1.466	n. s.	-2.053	n. s.	<b>-9.477***</b>	0.69	<b>-10.109***</b>	0.73	<b>-5.328***</b>	0.38					
60	n. s.	n. s.	<b>-7.268***</b>	0.52	<b>-5.359***</b>	0.39	<b>-9.701***</b>	0.7	<b>-8.621***</b>	0.62	<b>-6.425***</b>	0.46					
40	40	n. s.	<b>-2.463#</b>	0.18	<b>-3.016*</b>	0.22	<b>-3.569**</b>	0.26	<b>-5.852***</b>	0.42	<b>-2.309</b>	n. s.					
60	n. s.	n. s.	<b>-8.265***</b>	0.6	<b>-6.322***</b>	0.46	<b>-3.794***</b>	0.27	<b>-4.364***</b>	0.31	<b>-1.212</b>	n. s.					
40	60	n. s.	<b>-5.802***</b>	0.42	<b>-3.306***</b>	0.24	-0.225	n. s.	-1.488	n. s.	<b>-1.096</b>	n. s.					

Basis: n=1152, Bonferroni-korrigierter Post-hoc-Test, #p<0.1, \*p<0.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001

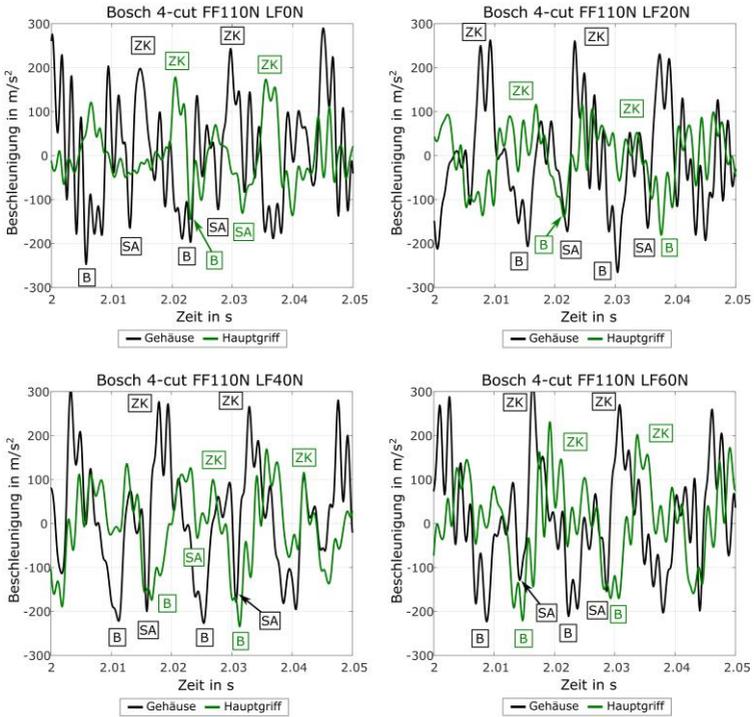


Abbildung B.1: Exemplarischer Einfluss der Querkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrergehäuses für den GBH 3-28 bei einer Vorschubkraft von 110 N

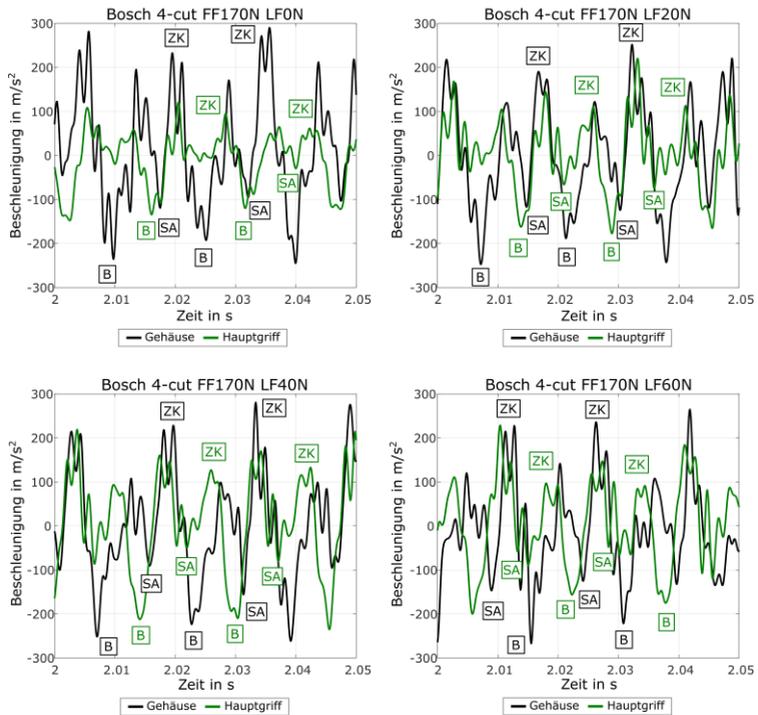


Abbildung B.2: Exemplarischer Einfluss der Querkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhämmergehäuses für den GBH 3-28 bei einer Vorschubkraft von 170 N

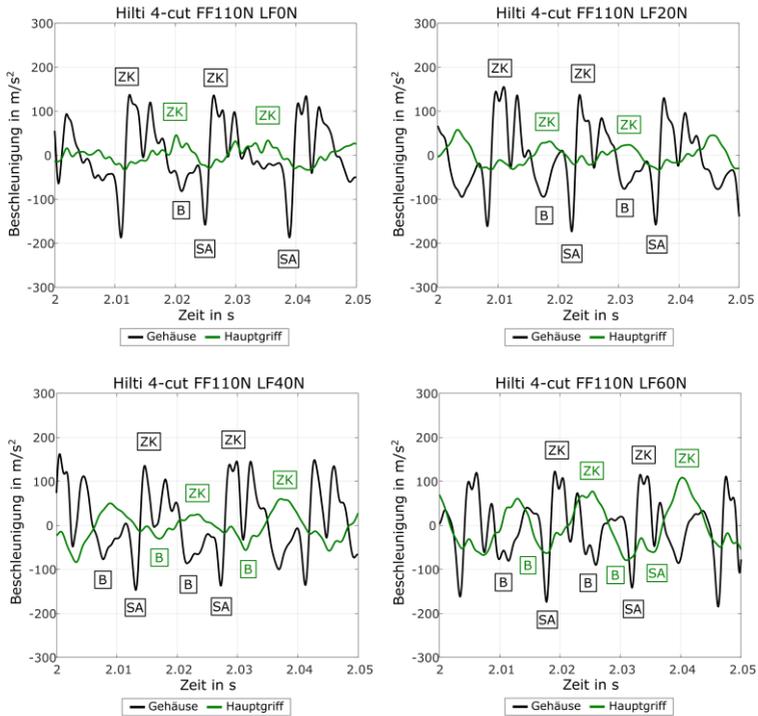


Abbildung B.3: Exemplarischer Einfluss der Querkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrergerätes für den TE 30 bei einer Vorschubkraft von 110 N

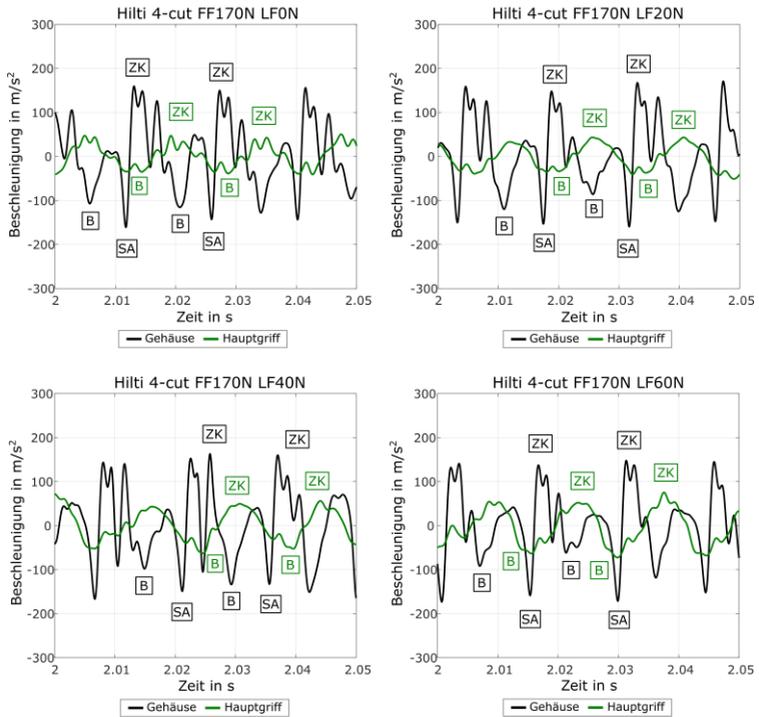


Abbildung B.4: Exemplarischer Einfluss der Querkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhämmergehäuses für den TE 30 bei einer Vorschubkraft von 170 N

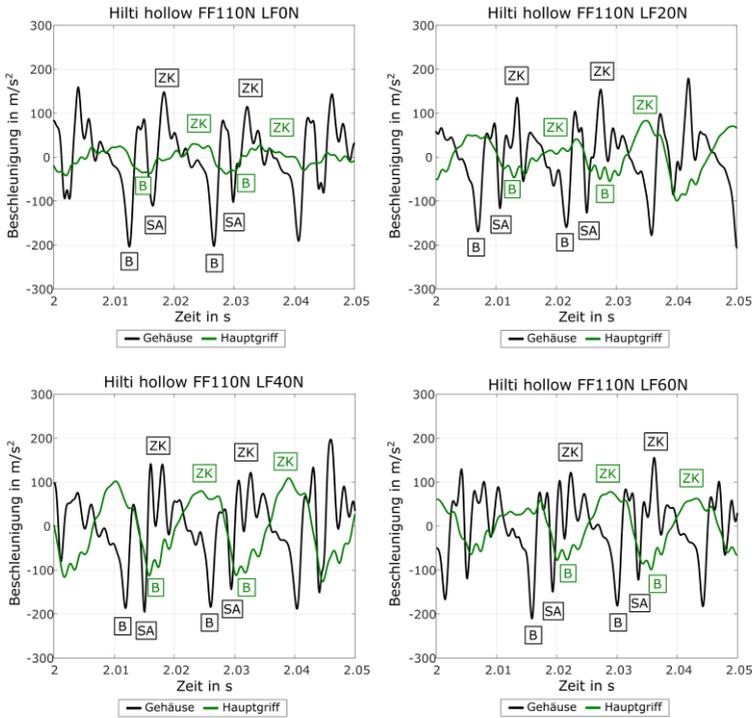


Abbildung B.5: Exemplarischer Einfluss der Querkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhämmergehäuses für den TE 30 in Kombination mit dem Hohlbohrer bei einer Vorschubkraft von 110 N

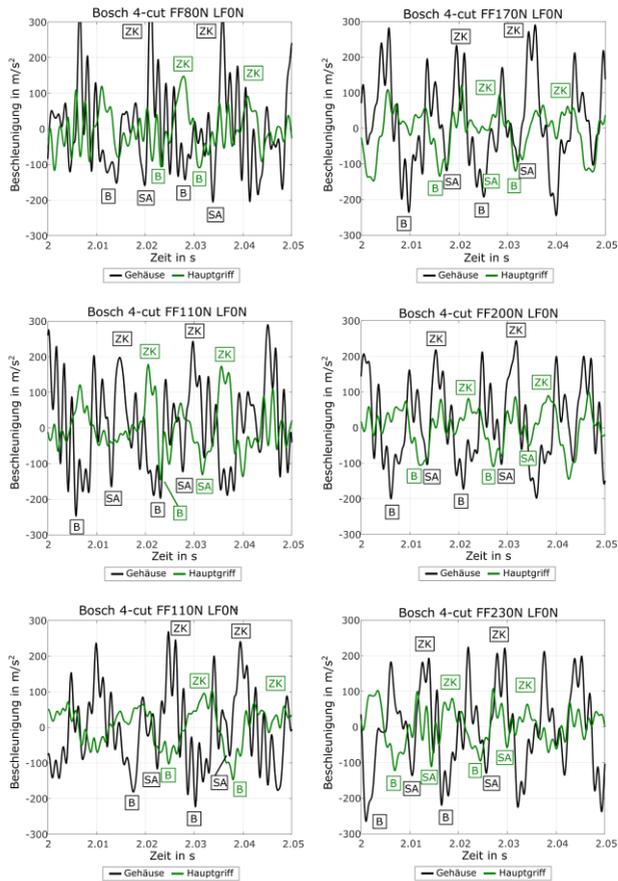


Abbildung B.6: Exemplarischer Einfluss der Vorschubkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrergehäuses für den GBH 3-28 in Kombination mit dem 4-Schneider bei einer Querkraft von 0 N

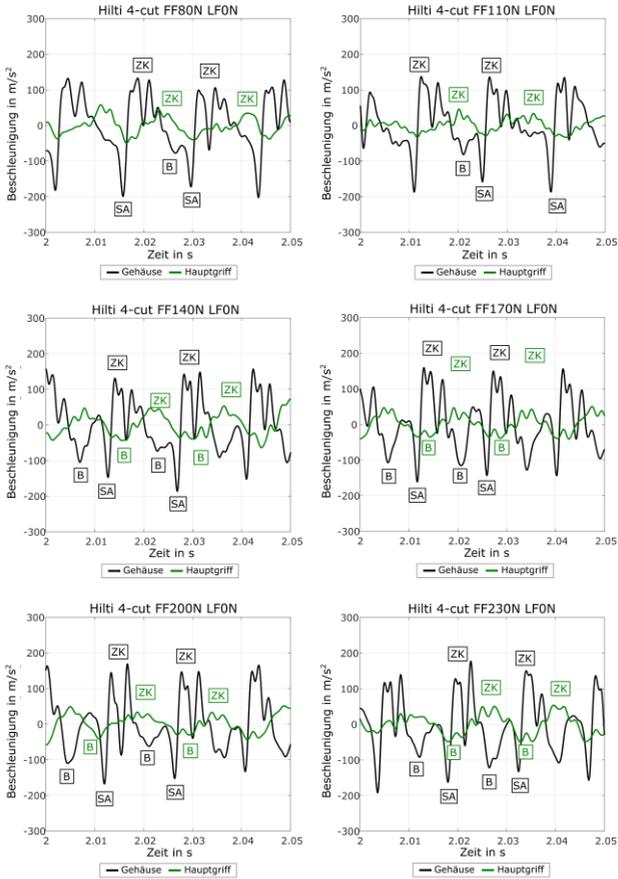


Abbildung B.7: Exemplarischer Einfluss der Vorschubkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrergerätes für den TE30 in Kombination mit dem 4-Schneider bei einer Querkraft von 0 N

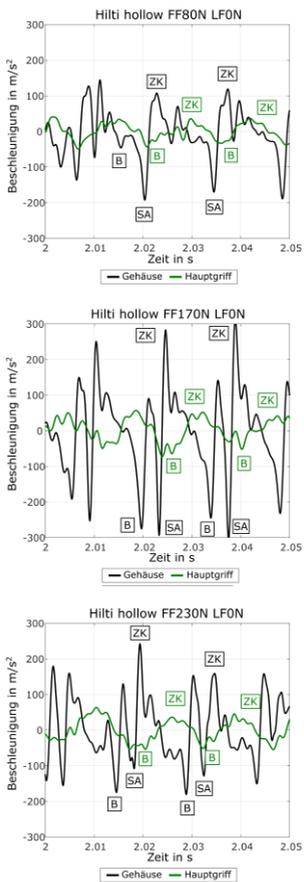


Abbildung B.8: Exemplarischer Einfluss der Vorschubkraft auf die Schwingung in z-Richtung des Bohrhammergehäuses für den TE 30 in Kombination mit dem Hohlbohrer bei einer Querkraft von 0 N

# Anhang C

## Kausale Studie II

Die folgenden Tabellen stammen aus der Veröffentlichung:

*„Analysis of Drill Bit Wear and its Influence on Productivity and Vibrations in Interaction with Feed and Lateral Force” (Uhl, Gauch et al., 2022)*

Tabelle C. 1: Ergebnis des Friedman-Tests zur Analyse der Einflussfaktoren auf den Verschleiß der Bohrspitze: n = 32.

unabhängige Variable	Friedman Test			0 vs. 21 m			0 vs. 10,5 m			10,5 vs. 21 m			
	df	$\chi^2$	p	r	z	p	r	z	p	r	z	p	r
<b>Hersteller 0</b>													
D05	2	12.794	.002	0.29	1.000	.014	0.25	0.156	1.000	0.04			
D35	2	30.125	< .001	0.48	0.875	.040	0.22	1.062	.008	0.27			
D47	2	15.125	.001	0.5	1.000	.014	0.25	1.000	.014	0.25			
AN	2	15.125	.001	0.34	0.688	.155	0.17	0.688	.155	0.17			
AC	2	26.000	< .001	0.44	1.250	.001	0.31	0.500	.472	0.13			
H	2	6.500	.039	0.22	0.625	.231	0.16	0.250	1.000	0.06			
<b>Hersteller 1</b>													
D05	2	32.000	< .001	0.5	1.000	.014	0.25	1.000	.014	0.25			
D35	2	32.000	< .001	0.5	1.000	.014	0.25	1.000	.014	0.25			
D47	2	32.000	< .001	0.5	1.000	.014	0.25	1.000	.014	0.25			
AN	2	28.500	< .001	0.47	-1.125	.004	0.28	-0.750	.102	0.19			
AC	2	32.000	< .001	0.5	1.000	.014	0.25	1.000	.014	0.25			
H	2	15.500	< .001	0.34	0.500	.472	0.13	0.875	.04	0.22			

Basis: N = 32

Tabelle C.2: Ergebnis der multifaktoriellen ANOVA zur Analyse der Einflussfaktoren (kumulierte Bohrmeter (CDM), Hersteller (ToM), Betonfestigkeit (C), Vorschubkraft (FF) und Querkraft (LF)) auf die  $a_{hv}$ -Werte des Hauptgriffs und des Gehäuses.  $n = 4800$ .

Quelle	df	$a_{hv}$ Hauptgriff <sup>a</sup>		$a_{hv}$ Gehäuse <sup>b</sup>	
		F	$\eta^2$	F	$\eta^2$
ToM	1	1215.648***	.191	1311.307***	.203
C	1	1962.429***	.276	1800.538***	.259
FF	1	603.253***	.105	2372.088***	.315
LF	1	4427.110***	.462	5827.077***	.531
CDM	2	267.784***	.094	284.629***	.100
C * CDM	2	205.103***	.074	268.828***	.095
ToM * C	1	36.258***	.007	,138	.000
C * LF	1	668.238***	.115	90.634***	.017
C * FF	1	310.685***	.057	8.374**	.002
ToM * CDM	2	3.159*	.001	4.416*	.002
LF * CDM	2	9.223***	.004	134.564***	.050
FF * CDM	2	4.777**	.002	7.150**	.003
ToM * LF	1	460.367***	.082	11.120**	.002
ToM * FF	1	17.056***	.003	54.256***	.010
FF * LF	1	221.775***	.041	801.957***	.135
Fehler	5150				
Gesamt	5171				

Basis: a:  $R^2 = .763$  (korrigiertes  $R^2 = .728$ ); b:  $R^2 = .864$  (korrigiertes  $R^2 = .844$ )  
 (C = Beton, ToM = Hersteller, FF = Vorschubkraft, LF = Querkraft, CDM = kumulierte Bohrmeter, df = Freiheitsgrade)

## Anhang D

### Verifikationsstudie - Bestimmung Kennwerte

Das Schubmodul  $G$  hängt von der Shorehärte und der Formfaktor  $K$  hängt vom Formkennwert  $K_f$  ab und können aus den entsprechenden Diagrammen (siehe Abbildung D.1 und Abbildung D.2) bestimmt werden.

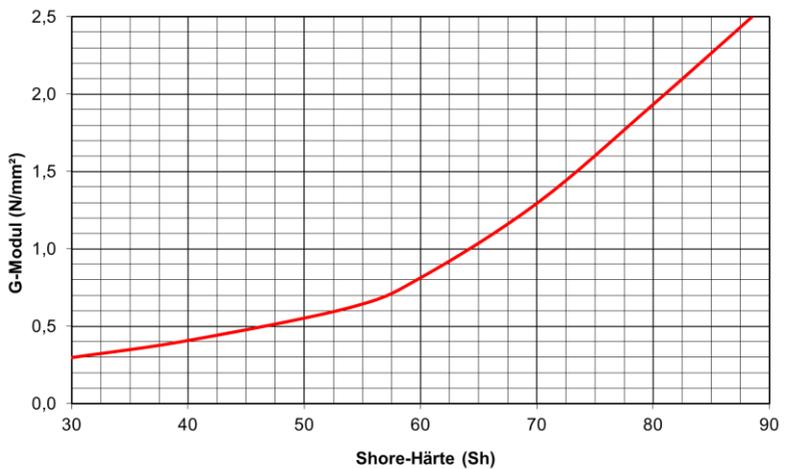


Abbildung D.1: Diagramm zur Bestimmung des Schubmoduls  $G$  (Schweizer, 2020b)

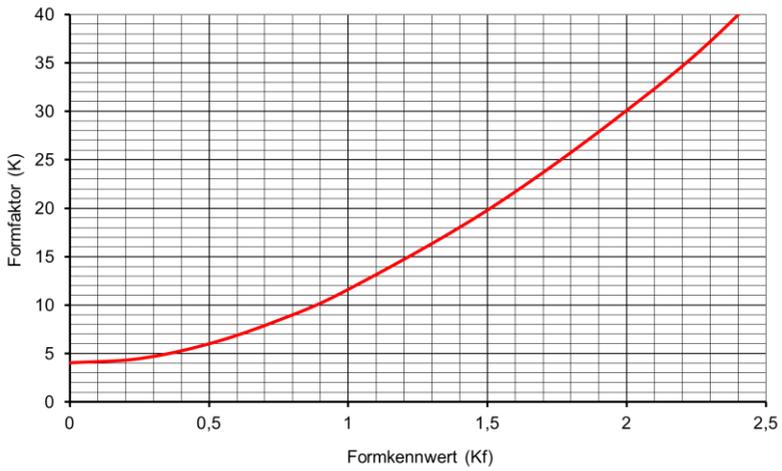


Abbildung D.2: Diagramm zur Bestimmung des Formfaktors K (Schweizer, 2020a)

## Verifikationsstudie - Bestimmung der Federsteifigkeiten

In Abbildung D.3 ist der Aufbau zur Vermessung der Federsteifigkeit der Griffentkopplung beider Bohrhammer abgebildet. Der Aufbau erlaubt es einen horizontalen Stab mit einer konstanten Geschwindigkeit den Griff des Bohrhammers zusammenzudrücken. In Kombination mit zwei parallel geschalteten Kraftsensoren kann die Federsteifigkeit der Griffentkopplung ermittelt werden.



Abbildung D.3: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Federsteifigkeit der Hauptgriffentkopplung beider Bohrhammer

Die beiden verwendeten Bohrhammer aus dieser Arbeit besitzen an den beiden Anbindungen des Hauptgriffs unterschiedliche konstruktive Lösungen. Dies führt dazu es entscheidend ist, wo die Kraft zur Bestimmung der Federsteifigkeit eingeleitet wird. Da sich dies je nach Anwender unterscheiden kann, wurden für die Untersuchung zwei Extremwerte gewählt. Diese sind in Abbildung D.4 mit Position 1 (durchgezogene Linie) und Position 2 (gestrichelte Linie) gekennzeichnet.



Abbildung D.4: Messpunkte 1 (Pos1) und 2 (Pos2) zur Bestimmung der Federsteifigkeit je Bohrhammer (links Bosch GBH 3-28 und rechts Hilti TE 30).

In Abbildung D.5 sind die Kennlinien der Federsteifigkeiten beider Bohrhammer abgebildet. Es ist einerseits zu erkennen, dass je näher an der unteren Griffanbindung des Bohrhammers gemessen wird, desto höher wird die Federsteifigkeit. Andererseits ist anzumerken, dass an Position 1 die Federkennlinien beider Bohrhammer im entscheidenden Bereich von 90 bis 170 N sich nahezu komplett überlagern.

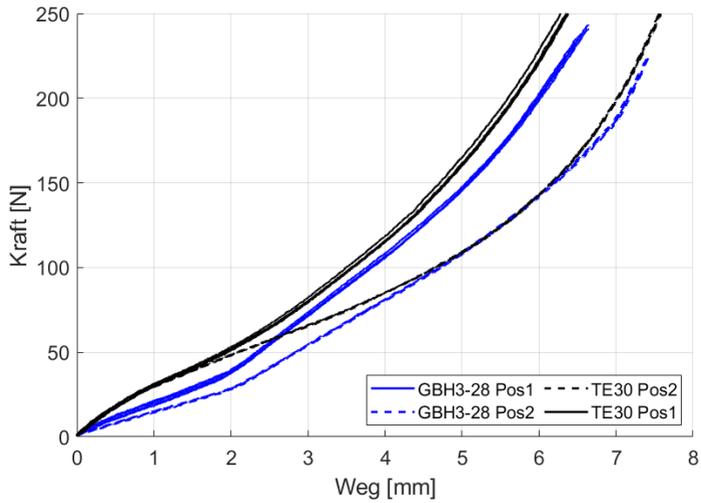


Abbildung D.5: Gemessene Federsteifigkeiten der beiden Bohrhämmer an den Messpunkten 1 (Pos1) und 2 (Pos2)



# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Michael Uhl  
Geburtsdatum: 09.03.1988  
Staatsangehörigkeit: Deutschland  
Familienstand: ledig

## Bildungsgang

09/2012 – 05/2014 Masterstudium Maschinenbau an der Hochschule  
Karlsruhe für Technik und Wirtschaft  
09/2008 – 06/2012 Bachelorstudium Maschinenbau an der Hochschule  
Karlsruhe für Technik und Wirtschaft

## Berufstätigkeit

07/2021 – heute R&D Engineer Testing bei der Hilti  
Entwicklungsgesellschaft mbH  
12/2015 – 06/2021 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für  
Produktentwicklung am Karlsruher Institut für  
Technologie (KIT)  
10/2017 – 11/2019 Forschungsgruppenleiter Gerätetechnik am IPEK –  
Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für  
Technologie (KIT)  
06/2014 – 09/2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule  
Karlsruhe für Technik und Wirtschaft