

Sebastian Zimprich

**Unabhängige Einstellung von Vorschubkraft,
Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim
Hammerbohren durch zyklische
Motoransteuerungen**

Independent adjustment of feed force, impact
frequency and single impact energy for hammer
drilling by cyclical motor controls

Band 189

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Copyright IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2026
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

Unabhängige Einstellung von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren durch zyklische Motoransteuerungen

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. Sebastian Zimprich

Tag der mündlichen Prüfung: 10.04.2025
Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

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 189

Bohrungen in harten Untergründen wie Beton oder Gestein werden durch das sogenannte Hammerbohrverfahren erzeugt. Stand der Technik ist die Nutzung eines sogenannten elektropneumatischen Schlagwerkes, um Hammerbohren durchzuführen. Dabei wird sowohl die Drehbewegung auf den Bohrer als auch die hämmernde translatorische Bewegung durch einen einzigen Elektromotor realisiert. Dazu findet im Antriebsstrang eine Leistungsverzweigung statt.

Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie sind drei Größen in elektropneumatischen Bohrwerken, die sich auf die Produktivität des Bohrgerätes auswirken. Einerseits wird der Bohrfortschritt durch sie beeinflusst, also die Produktivität einer einzelnen Bohrung, andererseits wird durch diese die Vibration auf den Anwender erzeugt, die durch Begrenzung der Nutzungsdauer ebenfalls produktivitätswirksam ist. Die Vorschubkraft wird durch den Anwender auf den Bohrhämmer aufgebracht, die Schlagfrequenz korreliert mit der Drehzahl des Motors und die Einzelschlagenergie hängt vor allen Dingen von der Geschwindigkeit des Flugkolbens zum Schlagzeitpunkt im elektropneumatischen Schlagwerk ab.

Für die Entwicklung von Bohrhämmern mit hoher Produktivität und niedriger Vibrationsemission auf die Anwender ist eine genaue Kenntnis dieser drei Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie auf die Produktivität notwendig. Bei allen in der Wissenschaft oder in Unternehmen verfügbaren Bohrhämmern stehen diese drei Faktoren in Wechselbeziehung zueinander. Sie bedingen sich gegenseitig, so dass sie nicht unabhängig voneinander einstellbar sind. Eine Auflösung dieser sogenannten Multikollinearität ermöglicht in der Wissenschaft erstmalig, diese drei Faktoren in ihrer Auswirkung auf Einzelschlagenergie und Vibrationsemission zu erforschen. In der Produktentwicklungspraxis in Unternehmen ermöglicht sie die gezielte und unabhängige Optimierung dieser drei Faktoren in zukünftigen Bohrhämmern.

In dieser Arbeit wird daher untersucht, wie Korrelationen von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren aufgelöst werden können. Um dies zu ermöglichen und die Faktoren in ihrer Auswirkung erforschbar zu machen, entwickelt Sebastian Zimprich den sogenannten DualDrive Bohrhämmer mit einem getrennten Antrieb für Schlagwerk und Bohrrotation und eine neue zyklische Motoransteuerung „Cyclical Independent Impact Drive (CIID)“. In sehr umfangreichen, teils automatisierten Bohranwendungen kann Sebastian Zimprich im Rahmen dieser Arbeit bisherige Widersprüche in verschiedenen Untersuchungen bezüglich der Bohrgeschwindigkeit im Zusammenhang mit Vorschubkraft und Schlagfrequenz auflösen und erklärbar machen. Erstmals gelingt es ihm, die Faktoren unabhängig einzustellen und damit Voraussagen und Übertragbarkeit in der Wissenschaft zu ermöglichen. Bezüglich

der Vibrationsemission (ahv-Wert) gelingt ihm ebenfalls erstmalig eindeutig interpretierbare Zusammenhänge zwischen den drei Faktoren und der Vibrationsemission. Ihm gelingt der Nachweis, dass es möglich ist, die Schlagfrequenz konstant zu halten während die Einzelschlagenergie durch die Motorsteuerung verändert werden kann. Auf Basis der von Sebastian Zimprich entwickelten Motorsteuerung kann die Einzelschlagenergie in Abhängigkeit von der anregenden Frequenz nachweislich zwischen 54 % und 20 % pro Einzelschlag variiert werden. Das ist schon ein beeindruckender Wert, wenn man davon ausgeht, dass die Einzelschlagenergie die Produktivität festlegt.

Die vorgelegten Erkenntnisse eröffnen völlig neue Möglichkeiten für die Produktentwicklung von Bohrhämmern.

April, 2025

Sven Matthiesen

Kurzfassung

Die Arbeitsproduktivität zu steigern ist ein Ansatz, um Kosten im Baugewerbe senken zu können. Neue Produktgenerationen von Bohrhämmern zielen daher auf eine geringere Belastung des Anwenders und höhere Bohrgeschwindigkeiten ab. Eine Reduktion der Vibrationsemission schützt präventiv vor vibrationsbedingten Erkrankungen und erhält somit langfristig die Arbeitsproduktivität. Eine gesteigerte Bohrgeschwindigkeit erhöht direkt die Arbeitsproduktivität. Daher kann die Arbeitsproduktivität und Anwenderbelastung beim Hammerbohren über die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission des Bohrhammers bewertet werden.

Kern des Problems bei Untersuchungen und Optimierungen beim Hammerbohren ist, dass die Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie stark korrelieren. Dies bedeutet zum einen, dass die Faktoren nur abhängig voneinander eingestellt werden können. Für verschiedene Anwendungen beim Hammerbohren sind jedoch unterschiedliche Faktorkombinationen optimal. Es müssen Kompromisse zwischen den genannten Faktoren gemacht werden, was Abstriche bezüglich der Arbeitsproduktivität und Anwenderbelastung zur Folge hat. Zum anderen können Effektanteile der Faktoren auf Zielgrößen des Bohrhammers nicht eindeutig einzelnen Faktoren zugeordnet werden. Optimale Faktoreinstellungen können daher unbekannt sein. Korrelierende Faktoren erschweren somit Optimierungen beim Hammerbohren.

In dieser Arbeit wurde daher untersucht, wie Korrelationen von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren aufgelöst werden können. Der in dieser Arbeit fokussierte Ansatz nutzt Motoransteuerungen. Der Bohrhammer *DualDrive* mit getrennt angetriebenem Schlagwerk und Bohrrotation wurde als Untersuchungsumgebung aufgebaut. Mit einer konstanten Motoransteuerung konnten die Effektanteile von Vorschubkraft und Schlagfrequenz auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission erstmalig in einer Bohrstudie bestimmt werden. Die neue zyklische Motoransteuerung *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* kann die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz einstellen. *CIID* ermöglichte eine Variation der Einzelschlagenergie um bis zu 54 % gegenüber dem Wert einer konstanten Motoransteuerung. In einer Bohrstudie wurde der Effekt einer unabhängig eingestellten Einzelschlagenergie auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission ermittelt.

Es wurde damit gezeigt, dass durch eine konstante sowie mit der Schlagfrequenz zyklischen Motoransteuerung die Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren unabhängig eingestellt werden können. Erstmals lässt sich die Einzelschlagenergie mit der neuen Motoransteuerung *CIID* unabhängig von der Schlagfrequenz einstellen. Die Auflösung der Korrelationen allein durch Motoransteuerungen ermöglicht weitere Optimierungen beim Hammerbohren.

Abstract

Increasing labour productivity is one approach to reducing costs in the construction industry. New product generations of hammer drills therefore aim to minimise user stress and increase drilling speeds. Reducing vibration emissions provides preventative protection against vibration-related occupational illnesses and therefore maintains labour productivity in the long term. Increased drilling speed directly increases labour productivity. Labour productivity and user stress during hammer drilling can therefore be assessed via the drilling speed and vibration emission of the hammer drill.

The problem with investigations and optimisations in hammer drilling is that the parameters feed force, impact frequency and single impact energy correlate strongly. On the one hand, this means that the factors can only be adjusted in relation to each other. However, different factors are optimal for different hammer drilling activities. Compromises must be made between the factors mentioned, which results in compromises in terms of labour productivity and user stress. On the other hand, the effects of the factors on the target variables of the hammer drill cannot be clearly assigned to individual factors. Optimum factor settings may therefore be unknown. Correlating factors therefore make optimisations in hammer drilling more difficult.

This work therefore investigated how correlations of feed force, impact frequency and single impact energy in hammer drilling can be resolved. The approach focussed on in this work uses motor controls. The *DualDrive* hammer drill with a separately driven impact mechanism and drill bit rotation was developed as a test environment. With constant motor control, the effect shares of feed force and impact frequency on the drilling speed and vibration emission could be determined for the first time in a drilling study. The new *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* motor control can adjust the single impact energy independently of the impact frequency. With CIID it was possible to vary the single impact energy by up to 54 % compared to the value of a constant motor control. The effect of an independently set single impact energy on the drilling speed and vibration emission was determined in a drilling study.

It was demonstrated that the parameters feed force, impact frequency and single impact energy can be set independently during hammer drilling with a constant and cyclic motor control. The motor control has to be cyclic with the impact frequency. For the first time, the single impact energy can be set independently of the impact frequency with the new *CIID* motor control. The resolution of the correlations solely through motor control enables further optimisation in hammer drilling.

Danksagung

Die vorliegende Forschungsarbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente am IPEK - Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen. Vielen Dank Sven für den Austausch in Lehre, Forschung und Innovationsprojekten. Du hast mir gezeigt, wie man Projekte angeht und sich diese zu eigen machen kann. Neben dieser Arbeit hast du hierdurch auch mich wissenschaftlich und persönlich weiterentwickelt. Für dein Vertrauen, die kompetente Betreuung und die gegebenen Freiräume möchte ich mich besonders bedanken.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer für die Übernahme des Korreferats. Die anregenden Diskussionen und Zusammenarbeit mit Ihnen haben mir stets großen Spaß gemacht. Herrn Prof. Dr.-Ing. Arne Rönnau danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ein herzlicher Dank richtet sich auch an das gesamte IPEK-Team – einschließlich der Verwaltung, des Sekretariats, der technischen Dienste und der IT-Abteilung – sowie an meine wissenschaftlichen Kolleginnen und Kollegen. Die wertvolle Zusammenarbeit und Unterstützung haben meine Arbeit am Institut und diese Forschungsarbeit erheblich bereichert.

Insbesondere möchte ich mich bei meinen Kollegen Dr.-Ing. Matthias Dörr, Jan Heinrich Robens, Dr.-Ing. Markus Döllken und Dr.-Ing. Andreas Lindenmann für die wissenschaftlichen Diskussionen und die konstruktiven Kommentare zu dieser Forschungsarbeit bedanken. Für das Korrekturlesen danke ich meiner Schwester Lisa. Ebenso danke ich Johannes Sängler für den wertvollen Austausch und die gute Zusammenarbeit in den Innovationsprojekten.

Ich möchte auch meinen herzlichen Dank an alle Studierenden aussprechen, mit denen ich während meiner Zeit am Institut zusammenarbeiten durfte. Durch eure Unterstützung und euren Einsatz habt ihr maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen! Besonders hervorheben möchte ich hier Frieder Matter und Johannes Reiser. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Danke!

Mein herzlichster Dank gilt meinen Freunden, meiner Familie und vor allem meinen Eltern. Danke für die Unterstützung während meines Studiums und meiner Promotion.

März 2026

Sebastian Zimprich

„Wir müssen unbedingt Raum für Zweifel lassen, sonst gibt es keinen Fortschritt, kein Dazulernen. Man kann nichts Neues herausfinden, wenn man nicht vorher eine Frage stellt. Und um zu fragen, bedarf es des Zweifels.“
Richard Feynman, 1965

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xix
Formelzeichen	xxi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1 Grundlagen	3
2.1.1 Schlagende Bohrprozesse.....	3
2.1.2 System Bohrerhammer	5
2.1.3 Elektropneumatische Schlagwerke.....	6
2.1.4 Versuchsplanung.....	9
2.1.5 Multikollinearität.....	11
2.2 Untersuchungen beim Hammerbohren	12
2.2.1 Zielgrößen der Untersuchungen	13
2.2.2 Umgang mit Störgrößen in Untersuchungen beim Hammerbohren.....	15
2.2.3 Automatisierte Untersuchungen zur Reduktion von Störgrößen des Anwenders.....	23
2.3 Effekte der Anwenderkräfte beim Hammerbohren	27
2.4 Effekte des Bohrerhammers beim Hammerbohren	33
2.5 Ansätze von zyklischen Ansteuerungen für Motoren	39
2.5.1 Untersuchungen für Schlagschrauber	39
2.5.2 Experimentelle Untersuchungen zur zyklischen Ansteuerung von Flugdrohnen	42
2.6 Fazit zu Grundlagen und Stand der Forschung	44
3 Motivation und Zielsetzung	47
4 Forschungsdesign	49

5	Auflösung der Korrelation von Schlagfrequenz und Vorschubkraft	55
5.1	Methode.....	56
5.1.1	Versuchsdesign	56
5.1.2	Modifizierter Bohrhammer DualDrive als Untersuchungsumgebung	60
5.1.3	Prüfstand und Versuchsaufbau	62
5.1.4	Datenauswertung der Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission	64
5.2	Ergebnisse.....	65
5.2.1	Validierung der getrennten Einstellung von Schlagfrequenz und Vorschubkraft.....	66
5.2.2	Getrennter Effekt von Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Bohrgeschwindigkeit (ROP)	67
5.2.3	Getrennter Effekt von Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Vibrationsemission (a_{HV} -Wert).....	69
5.3	Diskussion	72
5.3.1	Validierung der getrennten Einstellung von Schlagfrequenz und Vorschubkraft.....	72
5.3.2	Getrennter Effekt von Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Bohrgeschwindigkeit (ROP)	74
5.3.3	Getrennter Effekt von Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Vibrationsemission (a_{HV} -Wert).....	75
5.4	Einschränkungen der Studie	77
5.5	Zwischenfazit	78
6	Auflösung der Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie	81
6.1	Methode.....	82
6.1.1	Zyklische Motoransteuerung CIID für elektropneumatische Schlagwerke	83
6.1.2	Umsetzung der Motoransteuerung in der Untersuchungsumgebung DualDrive.....	89
6.1.3	Messverfahren zur Bestimmung der Einzelschlagenergie.....	91
6.1.4	Bohrstudie zum Effekt von CIID auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission	96
6.1.5	Datenauswertung zur Untersuchung der zyklischen Motoransteuerung CIID.....	99
6.2	Ergebnisse.....	101
6.2.1	Einfluss von CIID auf die Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen	102
6.2.2	Unabhängige Einstellung der Einzelschlagenergie durch CIID	104

6.2.3	Effekt von CIID auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission	109
6.3	Diskussion	112
6.3.1	Einfluss von CIID auf die Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen	112
6.3.2	Unabhängige Einstellung der Einzelschlagenergie durch CIID	114
6.3.3	Effekt von CIID auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission	117
6.4	Einschränkungen der Studie	119
6.5	Zwischenfazit	120
7	Zusammenfassung und Ausblick	123
7.1	Zusammenfassung	123
7.2	Ausblick	127
	Literaturverzeichnis	I
	Veröffentlichungen unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit	XIX
	Glossar	XXIII
	Anhang A	XXV
	Parametersatz der Vektorregelung des Schlagwerkantriebs	XXV
	Lebenslauf	XXVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Bohren in Gestein. Unterschiede von Schlagbohren und Hammerbohren (Robert Bosch GmbH, 2003, S. 156).	4
Abbildung 2.2:	Funktionsprinzip eines Bohrhammers.	5
Abbildung 2.3:	Aufbau und Funktionsweise eines pneumatischen Schlagwerks (Schweizer, 2004).	7
Abbildung 2.4:	Mit den Schlägen zyklisch verlaufender Druck der Luftfeder im elektropneumatischen Schlagwerk. (Wiedner, 2008).....	8
Abbildung 2.5:	Schematische Darstellung eines untersuchten Systems.	10
Abbildung 2.6:	Frequenzabhängiger Bewertungsfaktor zur Berechnung des a_{hv} -Wertes	14
Abbildung 2.7:	Wichtige Einflussgrößen auf die Reproduzierbarkeit	16
Abbildung 2.8:	Ersatzuntergrund <i>Dynaload</i> zur reproduzierbaren Dämpfung der Schläge eines Bohrhammers	20
Abbildung 2.9:	Betrag (links) und Phase (rechts) der mechanischen Impedanz	22
Abbildung 2.10:	Versuchsstand nach Cronjäger et al. (1984) mit einem Hand-Arm-Modell.....	24
Abbildung 2.11:	Definition der Kräfte beim Hammerbohren nach Uhl (2022). ...	26
Abbildung 2.12:	Unterschiedliche systemspezifische Erkenntnisse zum Effekt der Vorschubkraft auf die ROP.....	30
Abbildung 2.13:	Systemspezifische Änderung der Schlagfrequenz durch steigende Vorschub- und Querkräfte.....	31
Abbildung 2.14:	Änderung der Bohrleistung bei konstanter Schlagleistung	34
Abbildung 2.15:	Untersuchter Senkbohrhammer beim Imlochhammerbohren nach Liu et al. (2017).....	37
Abbildung 2.16:	Bohrhammer mit getrenntem Antriebsstrang für Bohrdrehzahl und Schlagfrequenz als Untersuchungsumgebung.	38
Abbildung 2.17:	Schlagwerk mit V-Nut eines Tangential-Schlagschrauber	40
Abbildung 2.18:	Vorgabe einer sinusförmigen Motordrehzahl (blau) nach Lee et al. (2013).....	42
Abbildung 2.19:	Die nicht starre Kopplung mit einer zyklischen Ansteuerung ermöglichte die Nick-Bewegung (Paulos & Yim, 2013).....	43

Abbildung 2.20:	Blockschaubild für Untersuchungen beim Hammerbohren.	46
Abbildung 4.1:	Forschungsdesign mit zwei Forschungsfragen zum Auflösen der Korrelationen	51
Abbildung 5.1:	Versuchsplan zur Untersuchung der unabhängigen Effekte ...	59
Abbildung 5.2:	Der konventionelle Bohrhämmer und der modifizierte Bohrhämmer <i>DualDrive</i>	61
Abbildung 5.3:	Roboter mit sechs Achsen und einstellbarer Vorschubkraft für automatisierte Hammerbohrversuche.	63
Abbildung 5.4:	Mittelwerte und Standardabweichung der Bohrgeschwindigkeit (ROP) für die sieben Faktorkombinationen	68
Abbildung 5.5:	Mittelwerte und Standardabweichung der Vibrationsemission (a_{hv}) für die sieben Faktorkombinationen	70
Abbildung 6.1:	Konzept einer mit der Schlagfrequenz zyklischen, aber dennoch um eine Kurbelumdrehung konstanten, Motordrehzahl.	84
Abbildung 6.2:	Die Drehzahl beeinflusst den Weg des Kolbens und indirekt die Position des Flugkolbens.	85
Abbildung 6.3:	Eine konstante Vorgabe der Solldrehzahl im Vergleich zu einer zyklisch vorgegebenen Solldrehzahl.....	88
Abbildung 6.4:	Antriebsstrang des elektropneumatischen Schlagwerks der Untersuchungsumgebung <i>DualDrive</i>	90
Abbildung 6.5:	Skizze der verwendeten Messstange zur Bestimmung der Einzelschlagenergie in dieser Studie.	92
Abbildung 6.6:	Das Messverfahren zur Bestimmung der Einzelschlagenergie in dieser Studie.	93
Abbildung 6.7:	Sechs Einstellungen der Motoransteuerung wurden nacheinander in einem Versuch untersucht.	95
Abbildung 6.8:	Prüfstand der automatisierten Bohrstudie zur Bestimmung der Effekte auf die Vibrationsemission und Bohrgeschwindigkeit. ..	98
Abbildung 6.9:	Auswertung der Motordrehzahl über den Kurbelwinkel zur Bewertung des zyklischen Effektes der Motoransteuerung. ...	100
Abbildung 6.10:	Gemessene Motordrehzahlen, aufgetragen über den Kurbelwinkel α	103
Abbildung 6.11:	Variation der Einzelschlagenergie bei einer konstanten Schlagfrequenz von 25 Hz.....	107
Abbildung 6.12:	Variation der Einzelschlagenergie bei einer konstanten Schlagfrequenz von 37,5 Hz.....	108

Abbildung 6.13:	Variation der Einzelschlagenergie bei einer konstanten Schlagfrequenz von 50 Hz	109
Abbildung 6.14:	Gemessene ROP- (grün) und a_{HV} -Werte (schwarz) der automatisierten Bohrstudie.....	110
Abbildung 7.1:	Blockschaubild für Untersuchungen beim Hammerbohren	124

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1:	Systemspezifische Korrelation zwischen Vorschubkraft und Schlagfrequenz für den Bohrhämmer Bosch GBH 4 32	58
Tabelle 5.2:	Vergleich der Soll- und Ist-Werte für die Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl	66
Tabelle 5.3:	Modellterme der mehrfaktoriellen Varianzanalyse	69
Tabelle 5.4:	Modellterme der mehrfaktoriellen Varianzanalyse	71
Tabelle 6.1:	In der Bohrstudie eingestellte Faktorstufen der Einzelschlagenergie	96
Tabelle 6.2:	Anzahl der Schläge, Einzelschlagenergien, Schlagfrequenzen und Motorströme	105
Tabelle A.1:	Eingestellte Parameter der Vektorregelung im Motor-Controller VESC 6 MkV	XXV

Abkürzungsverzeichnis

ABI	Binärschnittstelle: application binary interface
ANOVA	Varianzanalyse (aus dem Englischen: analysis of variance)
BLDC - Motor	Bürstenloser Gleichstrommotor
CEN/TR	Technischer Report des Europäischen Komitees für Normung
CI	Konfidenzintervall
CIID	Cyclical Independent Impact Drive
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
EN	Europäische Norm
EPTA	European Power Tools Association
eRPM	Elektrische Umdrehungen pro Minute eines Motors
FK	Faktorkombination
ISO	Internationale Organisation für Normung/International Organization for Standardization
PID	Proportional-Integral-Differenzial (Regler)
ROP	Bohrgeschwindigkeit (aus dem Englischen: rate of penetration)
SD	Standardabweichung (aus dem Englischen: standard deviation)
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter Protokoll

Formelzeichen

A	Querschnittsfläche der EPTA Messstange in mm ²
a_{hv}	Frequenzbewerteter Beschleunigungswert nach DIN EN ISO 5349-1:2001 in m/s ²
E	Elastizitätsmodul in N/mm ²
EE	Einzelschlagenergie nach EPTA 05/2009 in J
f	Effektgröße nach Cohen (2013)
F	Kraft auf den Flugkolben in N
I	Akustische Impedanz in kg/(m ² *s)
K _p	Proportionaler Verstärkungsfaktor
K _i	Integraler Verstärkungsfaktor
K _d	Derivativer Verstärkungsfaktor
l	Länge der EPTA Messstange in mm
l ₁	Position des DMS en der EPTA Messstange in mm
n	Anzahl
p	Druck der Luftfeder in bar
ROP	Bohrgeschwindigkeit in mm/s
s	Bohrweg in mm
t	Zeit in s
T	Dauer einer Stoßwelle nach EPTA 05/2009 in s
α	Motorwinkel oder Kurbelwinkel in °
đ	Solldrehzahl des Motors und der Kurbel in 1/min
β	Beschleunigungswinkel in °
ε	Dehnung in mm/m
η ²	partielles Eta-Quadrat

1 Einleitung

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Untersuchungen beim Hammerbohren. Beim Hammerbohren wird die Drehbewegung des Bohrers mit Schlägen überlagert. Durch diese Überlagerung kann auch in harten Baustoffen, wie etwa Beton, ein hoher Arbeitsfortschritt erzielt werden. Hammerbohren wird im Stand der Forschung oftmals bezüglich der Zielgrößen Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsbelastung auf den Anwender untersucht (Botti et al., 2020; Lindenmann, Uhl, Gwosch & Matthiesen, 2021; Uhl, Robens, Gauch, Gwosch & Matthiesen, 2023). Diese Zielgrößen leiten sich einerseits auf dem Ziel ab, die Produktivität im Baugewerbe durch ein effizienteres Hammerbohren zu steigern (Gao et al., 2024). Andererseits ist bekannt, dass die Arbeit mit Bohrhämmern durch die Vibrationsemission zu Erkrankungen führen kann (Poole et al., 2019). Eine erhöhte Produktivität beim Hammerbohren schützt auch den Anwender, da diese Tätigkeit hierdurch schneller abgeschlossen werden kann. Die Optimierung von Bohrgeschwindigkeit und der Vibrationsbelastung beim Hammerbohren schützt daher den Anwender.

Studien von Frey, Jacobasch, Kuntze und Plietsch (2003), Yan, Huang und Zou (2016), Botti et al. (2020) sowie Uhl, Robens, Gauch, Germann und Matthiesen (2023) konnten aufzeigen, dass die Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission haben. Sie konnten aber auch aufzeigen, dass gerade diese Faktoren miteinander korrelieren. Diese systemspezifische Korrelation führt zu teils divergierenden Erkenntnissen im Stand der Forschung für die untersuchten Faktoren. Daher führen Autoren in der Limitierung ihrer Studie auch auf, dass die Untersuchung mit einem anderen Bohrhämmer oder Bohrer zu anderen Erkenntnissen kommen könnte (Botti et al., 2020). Dies schränkt die Übertragbarkeit von Erkenntnissen der Studien zum Hammerbohren im Stand der Forschung ein.

Für gezielte Untersuchungen und Optimierungen eines Systems müssen Faktoren gezielt und reproduzierbar eingestellt werden, um die Effekt der Faktoren unabhängig voneinander auf die Zielgröße beziehen zu können. Bedingt durch das zu untersuchende System kann es jedoch sein, dass zwei oder mehrere Faktoren Korrelationen aufweisen. Dies wird als Multikollinearität bezeichnet (Albers, 2009).

Miteinander korrelierende Faktoren stellen für eine Untersuchung ein Problem dar. So können statt unabhängiger Faktoren nur voneinander abhängige Faktorkombinationen untersucht werden. Zusätzlich führt die starke Korrelation der

Faktoren dazu, dass berechnete Effekte große Standardfehler oder große Konfidenzintervalle aufweisen. Die Aussagekraft der Untersuchung ist daher bei Multikollinearität stark eingeschränkt (Farrar & Glauber, 1967). Die Aussagekraft von Untersuchungen beim Hammerbohren wird daher durch die Multikollinearität der Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie eingeschränkt.

Diese Arbeit hat daher das Ziel, Korrelationen der Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren aufzulösen. Die Auflösung der Korrelationen würde die Übertragbarkeit von Untersuchungen beim Hammerbohren steigern. Die Erreichung des Ziels soll experimentell nachgewiesen werden.

Diese Arbeit gliedert sich hierfür wie folgt:

Nach dieser Einleitung werden in Kapitel 2 Grundlagen zum Hammerbohren und zur Versuchsplanung vorgestellt. Basierend hierauf werden Untersuchungen zum Hammerbohren aus dem Stand der Forschung analysiert. Aus dem aufgeführten Stand der Forschung wird ein Fazit gezogen.

Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 die Motivation dieser Arbeit erläutert und daraus das Forschungsziel abgeleitet.

Die hieraus abgeleiteten Forschungsfragen und das darauf aufbauende Forschungsdesign werden in Kapitel 4 vorgestellt.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit den Faktoren Vorschubkraft und Schlagfrequenz und deren Korrelation beim Hammerbohren.

In Kapitel 6 wird die Korrelation der Faktoren Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie untersucht und mit einer neuen Motoransteuerung beeinflusst.

Kapitel 7 fasst diese Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf potentielle und auf dieser Arbeit aufbauende Forschungsrichtungen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Abschnitt werden die erforderlichen Grundlagen sowie der für diese Arbeit relevante Stand der Forschung dargestellt.

Kapitel 2.1 behandelt die notwendigen Grundlagen dieser Arbeit zum Hammerbohren und zur Versuchsplanung.

Kapitel 2.2 stellt Untersuchungen zum Hammerbohren vor. Es wird aufgezeigt, welche Zielgrößen im Stand der Forschung beim Hammerbohren besonders relevant sind und wie im Stand der Forschung beim Hammerbohren mit Störgrößen umgegangen wird. Die Nutzung von automatisierte Prüfständen zur Substitution des Anwenders in Untersuchungen wird vorgestellt.

Basierend hierauf werden in Kapitel 2.3 Effekte des Anwenders beim Hammerbohren erläutert. Kapitel 2.4 stellt analog hierzu Effekte des Bohrhammers vor.

In Kapitel 2.5 werden ausgewählte zyklische Motoransteuerungen vorgestellt. Diese können dazu verwendet werden, um in Untersuchungen Faktoren unabhängig voneinander einzustellen.

Das Kapitel 2.6 zieht ein Fazit zu den Grundlagen und zum aufgeführten Stand der Forschung und leitet hieraus die in dieser Arbeit adressierte Wissenslücke ab.

2.1 Grundlagen

In diesem Unterkapitel wird das Bohrverfahren Hammerbohren beschrieben. Hierfür wird auf das Power-Tool Bohrhammer eingegangen und dessen Schlagwerk näher erläutert. Zusätzlich werden Grundbegriffe der Versuchsplanung eingeführt.

2.1.1 Schlagende Bohrprozesse

Beim Bohren in mittelharte bis harte Baustoffe, wie etwa Beton, Naturstein oder Kalksandstein, wird die Drehbewegung des Bohrers mit Schlägen überlagert. Erst durch das Ausschlagen von Material durch die Schläge wird ein ausreichend hoher Arbeitsfortschritt erzielt. Für schlagende Bohrprozesse werden Bohrwerkzeuge für

Stein mit Hartmetall-Meißelschneiden verwendet. Bei handgehaltenen Maschinen lassen sich schlagende Bohrprozesse grundlegend in Schlag- und Hammerbohren unterscheiden (Robert Bosch GmbH, 2003).

Schlagbohren wird vorzugsweise zum Bohren in mittelharte Baustoffe genutzt. Nutzt man Schlagbohren aber zum Bohren von Löchern in harte Baustoffe, wie beispielsweise Beton, so ist die Bohrgeschwindigkeit sehr gering. Hammerbohren hingegen kann auch zum Bohren bei harten Baustoffen genutzt werden. **Hammerbohren** besitzt im Vergleich zum Schlagbohren eine geringere Bohrdrehzahl, geringere Schlagzahl, eine höhere Einzelschlagenergie und erreicht einen höheren Arbeitsfortschritt. Die Unterschiede zwischen Hammerbohren und Schlagbohren sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Aufgrund der höheren Bohrgeschwindigkeit und der damit höheren Wirtschaftlichkeit hat sich im gewerblichen Umfeld Hammerbohren durchgesetzt. (Robert Bosch GmbH, 2003)

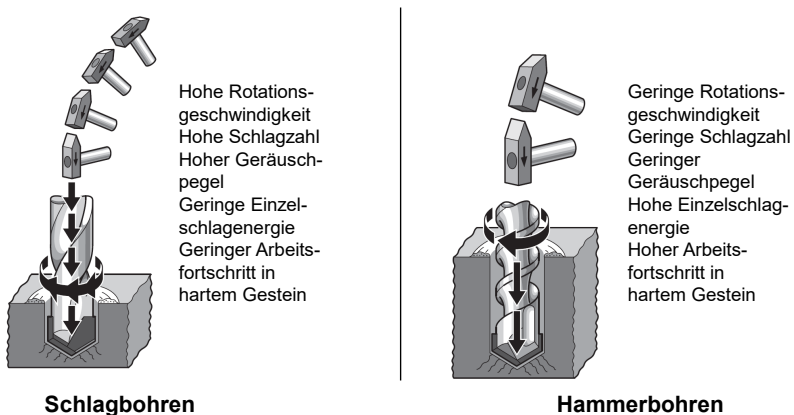


Abbildung 2.1: Bohren in Gestein. Unterschiede von Schlagbohren und Hammerbohren (Robert Bosch GmbH, 2003, S. 156).

Mit jedem Schlag beim Hammerbohren werden Teile aus dem Beton ausgeschlagen, welche durch die darauffolgenden Schläge zu Bohrmehl zertrümmert werden. Zwischen den Schlägen rotiert das Bohrwerkzeug. Der Winkelversatz zwischen zwei Schlägen ist der sog. Umsetzwinkel. Diese Rotation des Bohrers um den Umsetzwinkel sorgt dafür, dass das Bohrwerkzeug mit den Hartmetall-Meißelschneiden bei aufeinanderfolgenden Schlägen nicht in bereits eingebrachte Kerben schlägt. Durch die kontinuierliche Rotation der erzeugten

Kerben entsteht ein rundes Loch. Zusätzlich wird durch die Rotation des Bohrwerkzeugs über dessen Wendel das Bohrmehl aus dem Loch hinausbefördert. (Vonnemann, 1977)

2.1.2 System Bohrhammer

Beim Hammerbohren treiben handgehaltene Bohrhämmer die Drehung des Bohrwerkzeugs an. Gleichzeitig werden periodisch Schläge auf das Bohrwerkzeug ausgeübt. Als Werkzeughalter, der Schnittstelle zwischen Bohrhammer und Bohrwerkzeug, hat sich die Schnittstelle SDS etabliert. Diese Schnittstelle überträgt die Drehbewegung über Nuten am Bohrwerkzeug, erlaubt aber gleichzeitig einen translatorischen Freiheitsgrad. Hierdurch kann die Rotation des Bohrwerkzeugs beim Hammerbohren durch translatorische Schläge überlagert werden. (Schweizer, 2004)

Der Bohrhammer erzeugt die Schläge mit einem Schlagwerk. Dieses Schlagwerk wird zusammen mit dem Drehantrieb durch einen Elektromotor über ein Getriebe angetrieben. Das Schlagwerk und der Drehantrieb sind daher mechanisch gekoppelt. Durch Schaltkupplungen ist es möglich, den Leistungsfluss zum Drehantrieb oder zum Schlagwerk zu unterbrechen. So können Bohrhämmer zum Drehbohren oder im Meißelbetrieb genutzt werden. Das Funktionsprinzip des Antriebsstrangs eines Bohrhammers mit gekoppeltem Schlagwerk und Drehantrieb ist in Abbildung 2.2 dargestellt. (Uhl, 2022)

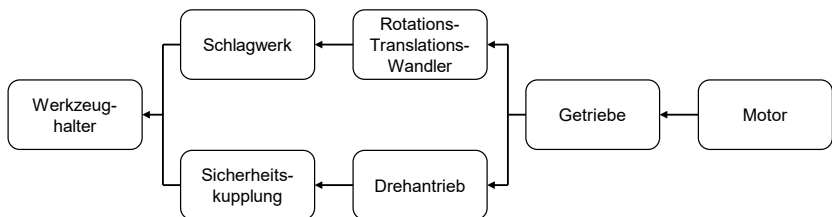


Abbildung 2.2: Funktionsprinzip eines Bohrhammers. Durch ein Getriebe sind der Antrieb von Schlagwerk und Drehantrieb gekoppelt (Uhl, 2022).

Abhängig von der Bauform des Bohrhammers kann der Rotations-Translations-Wandler zum Antrieb des Schlagwerks als Taumelantrieb oder Exzenterantrieb ausgeführt werden (Uhl, 2019). Schlagwerke können mechanische oder pneumatische Hammerschlagwerke sein. Mechanische Hammerschlagwerke werden hauptsächlich als Federschlagwerke ausgeführt. Pneumatische

Hammerschlagwerke, die durch einen Elektromotor angetrieben werden, heißen elektropneumatische Schlagwerke (Schweizer, 2004). Im gewerblichen Umfeld und auch im Heimwerkerbereich kommen hauptsächlich elektropneumatische Schlagwerke zum Einsatz. Diese stellen somit die relevanteste Bauform für Schlagwerke dar (Schweizer, 2004). In dieser Forschungsarbeit wurde ein Bohrhammer mit elektropneumatischem Schlagwerk verwendet. Daher wird im Folgenden nur auf die Funktionsweise dieser Schlagwerke genauer eingegangen.

2.1.3 Elektropneumatische Schlagwerke

Abbildung 2.3 zeigt den Aufbau eines pneumatischen Schlagwerkes mit den Komponenten und deren Bezeichnungen nach Schweizer (2004). Ein gleichbedeutender Begriff für das Luftpolster ist die Luftfeder (Uhl, 2022; Wiedner, 2008). Der Flugkolben kann in anderen Forschungsarbeiten auch Schläger heißen (Uhl, 2022). Für den Schlagbolzen ist auch der Begriff Döpper geläufig (Schäfer, 2018).

In diesem Beispiel ist der Rotations-Translations-Wandler als Kurbelwelle mit Pleuel ausgeführt. Der Antriebskolben und der Flugkolben sind nicht starr gekoppelt. Der Flugkolben wird durch die Bewegung des Antriebskolbens angetrieben. Die Luft zwischen Antriebskolben und Flugkolben wirkt als progressive Feder. Je nach Kompression und dem daraus resultierenden Druck wird der Flugkolben beschleunigt oder verzögert. Der Flugkolben besitzt somit einen translatorischen Freiheitsgrad.

Bei einem Schlagzyklus, wie in Abbildung 2.3 abgebildet, verdichtet die Vorwärtsbewegung des Antriebskolbens die Luftfeder, wodurch der Flugkolben beschleunigt wird. Dieser stößt auf den Schlagbolzen und gibt beim Aufprall ein Teil seiner kinetischen Energie ab. Diese kinetische Energie wird über den Schlagbolzen an das Bohrwerkzeug geleitet. Der Flugkolben prallt dabei am Schlagbolzen ab. Da sich nun auch der Antriebskolben zurückbewegt, wird der Flugkolben durch den resultierenden Unterdruck der Luftfeder zurückgezogen. Bewegt sich der Antriebskolben wieder nach vorne, so erhöht sich der Druck in der Luftfeder. Der Flugkolben wird wieder nach vorne beschleunigt und der Schlagzyklus beginnt von Neuem. (Schweizer, 2004)

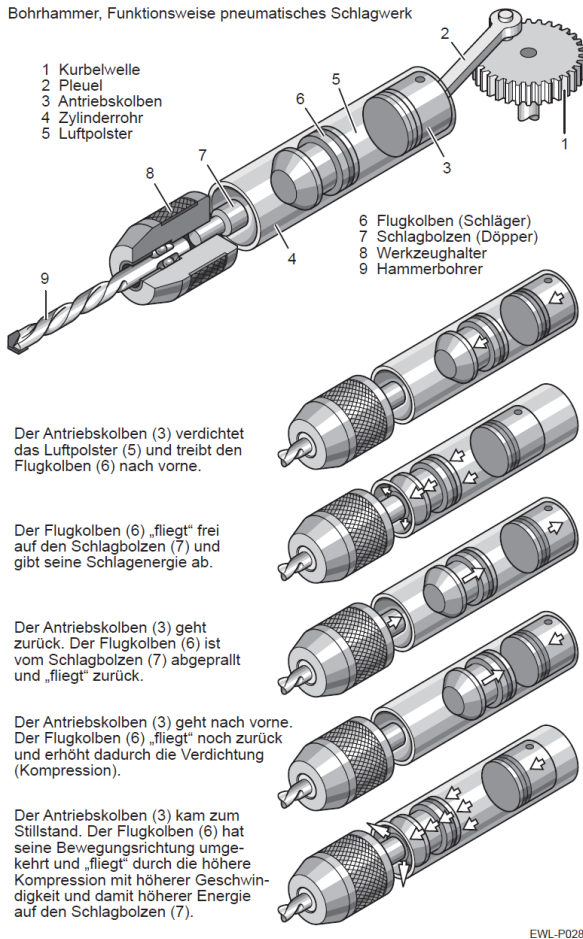


Abbildung 2.3: Aufbau und Funktionsweise eines pneumatischen Schlagwerks (Schweizer, 2004).

Wiedner (2008) betrachtete den Druck der Luftfeder im elektropneumatischen Schlagwerk. Der Verlauf des Druckes über den Schlagzyklus ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Durch die Kompression der Luftfeder bei jedem Schlag steigt der Druck stark an. Die Kraft der Luftfeder wirkt auf den Kolben. Daher wirkt auf den

Antriebsmotor des Bohrhammers ein mit jedem Schlag zyklisches Lastmoment (Bruchmüller, 2020; Riederer, 1985).

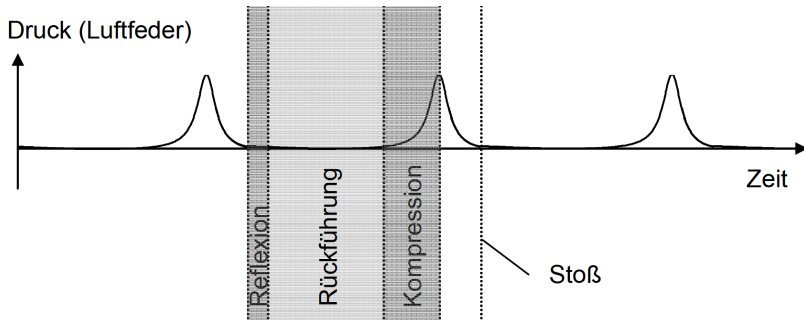


Abbildung 2.4: Mit den Schlägen zyklisch verlaufender Druck der Luftfeder im elektropneumatischen Schlagwerk. (Wiedner, 2008)

Damit eine möglichst hohe Bohrgeschwindigkeit erreicht wird, müssen zum Schlagzeitpunkt der zu bohrende Untergrund, das Bohrwerkzeug, der Schlagbolzen und der Flugkolben als Wirkungskette berührend zusammenliegen. In diesem Fall kann die kinetische Energie des Flugkolbens im Schlagzeitpunkt optimal an den Untergrund zur Gesteinszertrümmerung übertragen werden. Auch soll der Flugkolben den Schlagbolzen bei maximaler Geschwindigkeit treffen. Eine solche dynamische Abstimmung ist optimal, da hierdurch die übertragene kinetische Energie während der einzelnen Schläge maximal wird. In der Auslegung elektropneumatischer Schlagwerke wird daher darauf geachtet, dies durch eine geeignete Wahl der Gestaltmerkmale sicherzustellen. Gestaltparameter können hier beispielsweise der Durchmesser der Luftfeder, die Länge des Pleuels, der Durchmesser von kleinen Luftlöchern im Zylinderrohr oder die Masse von Flugkolben und Schlagbolzen sein. (Todorov, Peikov, Kamberov & Nikolov, 2010; Wiedner, 2008)

Pro Umdrehung der Kurbelwelle erzeugt ein pneumatisches Schlagwerk somit einen Schlag. Die Anzahl der Schläge pro Sekunde wird beim Hammerbohren die Schlagfrequenz genannt. Die Energie eines einzelnen Schlages ist die Einzelschlagenergie. Diese Einzelschlagenergie wird von Bohrhammerherstellern nach dem Messverfahren EPTA 05/2009 „Messung der Einzelschlagenergie von Bohr- und Meißelhämmern“ bestimmt (Nalbach, 2009). Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie werden von Herstellern seit dem 01.01.2011 für jeden Bohrhammer angegeben.

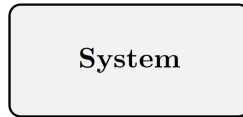
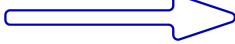
Für verschiedene Anwendungen beim Hammerbohren, wie etwa dem Bohren von verschiedenen Untergründen mit verschiedenen Bohrdurchmessern, werden Bohrhämmer verschiedener Gewichtsklassen verwendet. Ein steigendes Gerätegewicht geht in der Regel mit steigender Einzelschlagenergie und sinkender Schlagfrequenz eines Bohrhammers einher (Wiedner, 2008). Nach Vonnemann (1977) gibt es für eine hohe Bohrgeschwindigkeit ein optimales Verhältnis von Einzelschlagenergie zu Bohrdurchmesser. Die Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie des Bohrhammers sind daher wichtige Parameter, um Hammerbohren auf verschiedene Anwendungen abzustimmen. (Vonnemann, 1977)

2.1.4 Versuchsplanung

Möchte man Hammerbohren untersuchen oder optimieren, so ist es wichtig, die Systemgrenzen klar zu definieren. Diese Grenzen gelten für Untersuchungen allgemein. Denn nur so kann klar definiert werden, was Eingangsgrößen und Ergebnisse des zu untersuchenden Systems sind. Die Menge aller Eingangsgrößen in einem System werden Parameter genannt. Parameter, die in der Untersuchung gezielt geändert werden sollen, werden Faktoren genannt. Auch die Bezeichnung unabhängige oder erklärende Variable ist hierfür üblich (Porta, 2014). Die verschiedenen Einstellungen dieser Faktoren nennt man Faktorstufen oder Faktorlevel. Diese Faktorstufen müssen in Untersuchungen gezielt und reproduzierbar eingestellt werden. Es kann notwendig sein, die korrekte Einstellung der Faktoren in der Versuchsdurchführung zu überprüfen. Das Blockschaubild als schematische Darstellung eines untersuchten Systems mit den Eingangsgrößen und Ergebnissen ist in Abbildung 2.5 dargestellt. (Siebertz, 2010)

Faktoren

Eingangsgrößen,
die gezielt verändert
werden können



Zielgrößen

Ergebnisse



Störgrößen

Eingangsgrößen,
die nicht gezielt
verändert werden können
oder unbekannt sind

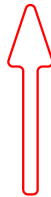


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines untersuchten Systems. Es ist das System mit den Eingangsgrößen, unterteilt in Faktoren (blau), Störgrößen (rot), sowie Ergebnissen (grün) aufgezeichnet (angelehnt an Siebertz, 2010).

Ein System hat somit Parameter als Eingangsgrößen. Sollen diese **Parameter** in Untersuchungen gezielt verändert werden, so werden diese Parameter als **Faktoren** bezeichnet. Ausgangsgrößen des Systems sind messbare Ergebnisse. Da diese oft in Untersuchungen optimiert werden sollen, werden diese auch Qualitätsmerkmale oder Zielgrößen genannt. Auch abhängige Variable ist eine übliche Bezeichnung (Porta, 2014). In einer Untersuchung lassen sich beliebig viele Zielgrößen erfassen und getrennt voneinander auswerten. Die Wirkung der jeweiligen Faktoren auf die Zielgrößen wird Effekt genannt. (Siebertz, 2010)

Sollen die Effekte mehrerer Faktoren innerhalb eines Systems untersucht werden, so müssen diese Faktoren gleichzeitig und unabhängig voneinander variiert werden. Um statistisch belastbare Ergebnisse zu erhalten, ist es auch notwendig diese Faktorkombinationen mehrfach zu testen. Methoden der statistischen Versuchsplanung geben hierzu Hilfestellungen und sind Standard für viele Anwendungen in Industrie und Wissenschaft. (Fisher, 1926)

Neben den Faktoren hat jedes System in der Untersuchung Parameter, welche nicht geändert werden sollen. Es muss daher darauf geachtet werden, dass diese Parameter konstant bleiben. In einem realen System haben Parameter jedoch

immer Störungen. Diese Parameter können daher auch Störgrößen genannt werden. Änderungen von Parametern, oftmals sind diese Parameter sogar unbekannt, lassen sich in Untersuchungen nicht ausschließen. Diese Störgrößen dürfen aber nicht systematisch zusammen mit den variierten Faktoren auftreten. Dies würde den Effekt der Störgröße mit dem Effekt eines Faktors vermischen. Da sich Störgrößen oft über die Zeit systematisch ändern, wird in der Versuchsplanung oftmals die Reihenfolge der untersuchten Faktorkombinationen randomisiert. Hierdurch werden Trendeffekte über den gesamten Versuchsplan vermischt. Neben der Versuchsreihenfolge kann zusätzlich die Randomisierung weiterer Parameter notwendig sein. Möchte man beispielsweise Erträge in der Landwirtschaft optimieren, so wird in der Versuchsplanung der Ort des Feldes randomisiert. Hierdurch werden örtliche Störgrößen von Wetter oder Bodenqualität über den gesamten Versuchsplan vermischt (Fisher, 1926). (Siebertz, 2010)

2.1.5 Multikollinearität

Um die jeweiligen Effekte mehrerer Faktoren in einem System bestimmen zu können, müssen diese unabhängig voneinander variiert werden. In empirischen Studien kann es jedoch vorkommen, dass dies nicht möglich ist, weil Faktoren miteinander lineare Abhängigkeiten haben können. Die starke lineare Abhängigkeit von zwei oder mehreren Faktoren wird als Multikollinearität bezeichnet. Bei empirischen Arbeiten ist das Problem der Multikollinearität von besonderer Bedeutung. (Albers, 2009)

Multikollinearität führt dazu, dass Effekte nicht mehr einem Faktor zugeordnet werden können, da sich mindestens ein weiterer Faktor linear abhängig dazu ändert. Die perfekte Korrelation führt dazu, dass Regressionsanalysen nicht mehr angewandt werden können (Kockelkorn, 2000). Mit der Berechnung der Korrelationskoeffizienten aller Parameter eines untersuchten Systems kann Multikollinearität identifiziert werden (Cohen, 2013). Eine perfekte Korrelation von zwei Parametern in Untersuchungen stellt jedoch die Ausnahme dar. Die starken Korrelationen zweier Faktoren führt dazu, dass die berechneten Effekte große Standardfehler oder große Konfidenzintervalle haben. Die Aussagekraft der Analyse wird daher durch Multikollinearität stark eingeschränkt (Farrar & Glauber, 1967; Ofir & Khuri, 1986; Steffen, 1994). Multikollinearität kann daher zum gleichen Problem führen wie kleine Stichproben. Man kann zwar Effekte berechnen, jedoch sind diese statistisch nicht belastbar. (Albers, 2009)

Nach Gujarati und Porter (2009) gibt es keine statistische Methode, um Multikollinearität in Untersuchungen vollständig beheben oder geeignet behandeln zu können. Hackl (2013) schlussfolgerte bezüglich der Multikollinearität: „In

manchen Situationen wird man nicht umhin können, mit den Auswirkungen der Multikollinearität zu leben“ (Hackl, 2013, S. 183). Er empfiehlt aber vorliegende Multikollinearität in einer Untersuchung nicht zu verschweigen und als Einschränkung der Untersuchung zu diskutieren (Hackl, 2013).

Zwischenfazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass miteinander korrelierende Faktoren für eine Untersuchung ein Problem darstellen können. Liegt Multikollinearität in einer Untersuchung vor, so können Faktoren nur kombiniert und damit nicht unabhängig voneinander eingestellt werden. Da die Einstellung der Faktoren nur eingeschränkt möglich ist, können zum einen optimale Faktorkombinationen nicht eingestellt werden. Zum anderen können Effekte der jeweiligen Faktoren nicht eindeutig bestimmt werden. Diese zwei Punkte erschweren die Optimierung und Untersuchung von Systemen und Anwendungen mit multikollinearen Faktoren.

2.2 Untersuchungen beim Hammerbohren

Hammerbohren ist eine häufige Tätigkeit im Baugewerbe. Die gebohrten Löcher werden genutzt, um mit Befestigern wie Betonankern, Betonschrauben oder Dübeln Anbauteile zu befestigen. Für den Bau einer einzigen Schallschutzwand kann es beispielsweise notwendig sein, 25.000 Löcher zu bohren (Rempel & Barr, 2015). Für den Bau von 21 km U-Bahn-Tunnel sind im Durchschnitt insgesamt 620.000 Bohrlöcher unterschiedlicher Größe erforderlich (Gao et al., 2024). Diese Löcher werden in der Regel manuell mit Bohrhämmern gebohrt. Es kann daher gesagt werden, dass die Optimierung von Hammerbohren ein vielversprechender Ansatz zur Steigerung der Produktivität und Senkung von Kosten im Baugewerbe ist. Eine Steigerung der Produktivität im Baugewerbe ist von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung, da das Baugewerbe einen Anteil von etwa 6 bis 9 % am Bruttoinlandsprodukt eines Landes hat (Arditi & Mochtar, 2000; Chitkara, 2019; Hasan, Baroudi, Elmualim & Rameezdeen, 2018).

Durch das Gewicht des Bohrhammers und die erforderliche Kraft ermüden die Anwender beim Hammerbohren (Anton et al., 2001; Blache, Desmoulins, Allard, Plamondon & Begon, 2015; Eaves, Gyi & Gibb, 2016). Optimierungen des Hammerbohrens hinsichtlich der Bohrgeschwindigkeit würden es erlauben, diese anstrengende Tätigkeit schneller abzuschließen. Anwender könnten sich dann erholen, während sie nicht anstrengende Aufgaben ausführen. Optimierungen beim Hammerbohren entlasten somit Anwender im Baugewerbe.

Neben einer Lärmbelastung, Staubemissionen und dem erschöpfenden Aspekt des Hammerbohrens, überträgt der Bohrhämmer auch Vibrationen auf den Anwender. Die Vibrationen werden über den Griff in die Finger, die Hand, den Arm und den Oberkörper übertragen (Dong, Wu & Welcome, 2005; Lindenmann et al., 2021; McDowell, Wiker, Dong & Welcome, 2007; Welcome et al., 2015). Bohrhämmer haben im Vergleich zu anderen Power-Tools starke Vibrationen. Die Exposition dieser Vibrationen kann zu muskuloskelettalen Erkrankungen und Nervenschäden führen (Zimmerman, Bain, Persson & Riley, 2017). Zu nennen ist beispielsweise das Raynaud-Syndrom, auch Weißfingerkrankheit genannt. Diese Krankheit ist eine anerkannte Berufskrankheit. Sie beeinträchtigt die Nerven, Muskeln und die Durchblutung der Hand, was zu Taubheitsgefühlen oder Schmerzen führen kann. Die Wahrscheinlichkeit am Raynaud-Syndrom zu erkranken steigt mit der Expositionsdauer und der Intensität der Vibrationsemission (Bovenzi, 1994; Gerhardsson, Balogh, Lambert, Hjortsberg & Karlsson, 2005; Poole et al., 2019).

Zwischenfazit

Es wurde gezeigt, dass die Arbeit mit Bohrhämmern zu Erkrankungen führen kann (Fridén, 2001; Poole et al., 2019). Die Optimierung von Hammerbohren schützt Anwender im Baugewerbe daher auch langfristig. Arbeitsproduktivität kann somit durch die Prävention von Berufskrankheiten länger erhalten bleiben. Daher wird Hammerbohren stetig untersucht und optimiert (Hecker & Riederer, 1985; Lindenmann et al., 2021; Oddo, Loyau, Boileau & Champoux, 2004; Pang & Goldsmith, 1992; Uhl, Lindenmann & Matthiesen, 2021; Weinert, Michel & Gillmeister, 1993; Wiedner, 2008).

2.2.1 Zielgrößen der Untersuchungen

Zielgrößen in Untersuchungen und Optimierungen beim Hammerbohren sind oft darauf ausgerichtet, die Arbeitsproduktivität zu erhöhen oder die Vibrationsexposition zu reduzieren, um den Anwender damit zu schützen.

Bei der Vibrationsexposition hat neben Expositionsdauer und Intensität der Vibration auch die Frequenz einen Einfluss auf das Schädigungspotential (Krajnak et al., 2012). Besonders kritisch sind Anregungen, welche Resonanzfrequenzen im menschlichen Hand-Arm-System anregen. Da Vibrationen bei unterschiedlichen Frequenzen auftreten, wurde hierfür ein Bewertungsfaktor entwickelt. Dieser Filter berechnet, basierend auf einem erfassten Vibrationssignal, das Schädigungspotential der Vibrationsemission. Das unterschiedliche Schädigungspotential der Frequenzen wird mit einem Bewertungsfaktor gewichtet. Das höchste Schädigungspotential wird Frequenzen um 16 Hz zugeschrieben. Der

frequenzabhängige Bewertungsfaktor ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Dieser Filter ist in der DIN EN ISO 5349-1:2001 genormt. Das Schädigungspotential kann mithilfe dieses Filters als a_{hv} -Wert zusammengefasst werden. Je höher dieser Wert, desto schädlicher wird die Vibrationsemission bewertet.

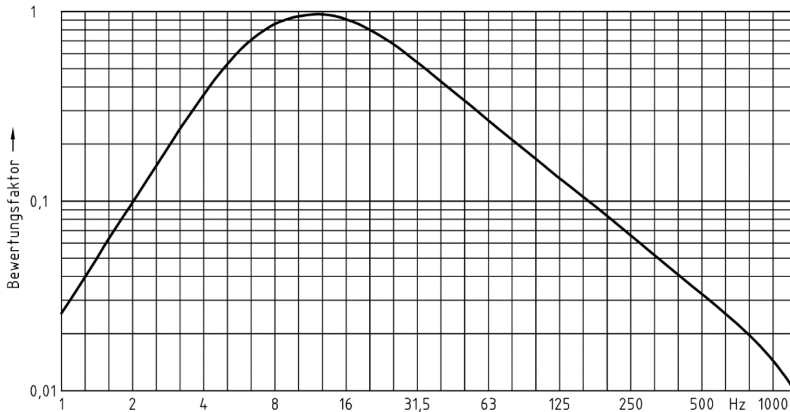


Abbildung 2.6: Frequenzabhängiger Bewertungsfaktor zur Berechnung des a_{hv} -Wertes durch einen Bewertungsfilter (DIN EN ISO 5349-1:2001).

Die Höhe des a_{hv} -Wertes legt die tägliche erlaubte Nutzungsdauer im gewerblichen Umfeld fest. Je höher dieser Wert, desto geringer ist die erlaubte tägliche Nutzungsdauer eines Power-Tools. Die tägliche erlaubte Nutzungsdauer ist nach der DIN CEN/TR 15350:2022-12 in Tabellenform angegeben. Hersteller sind daher verpflichtet, Power-Tools auf die Vibrationsemission zu untersuchen und diesen Wert anzugeben (Europäische Union, 2006). Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung des a_{hv} -Wertes für Bohrhämmer ist in der DIN EN ISO 28927-10:2011 genormt. Bohrhämmer mit einem niedrigeren a_{hv} -Wert verschaffen den Herstellern daher durch den genormten Gesundheitsschutz der Anwender einen Wettbewerbsvorteil. Untersuchungen beim Hammerbohren haben daher oft das Ziel, den a_{hv} -Wert zu reduzieren.

Neben einer Reduktion des a_{hv} -Wertes reduziert auch eine Erhöhung der Bohrgeschwindigkeit die Vibrationsexposition durch kürzere Bohrzeiten. Arbeiter können dann statt dem Bohren Tätigkeiten durchführen, bei welchen sie einer geringeren oder keiner Vibrationsexposition ausgesetzt sind. Eine Erhöhung der Bohrgeschwindigkeit sollte aber nicht mit einer Erhöhung des a_{hv} -Wertes einhergehen (Botti et al., 2020). Eine Reduzierung der Vibrationsexposition durch

kürzere Bohrzeiten würde durch einen erhöhten a_{hv} -Wert wieder aufgehoben werden.

Die Produktivität beim Hammerbohren kann über verschiedene Zielgrößen bewertet werden. Botti et al. (2020) bewerteten die Produktivität über den Bohrweg, welcher dem Anwender pro Tag gesetzlich erlaubt ist. Diese Zielgröße berücksichtigt für die Produktivität auch die Vibrationsemission der Anwendung.

Am geläufigsten ist im Stand der Forschung die Bewertung der Produktivität anhand der Bohrgeschwindigkeit (Botti et al., 2020; Cronjäger & Jahn, 1985; Hecker, 1983b; Kivade, Murthy & Vardhan, 2015; Rempel et al., 2019; Uhl, 2022; Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023). Gemessen wird diese Zielgröße mit der ROP (aus dem Englischen: rate of penetration) (Ersoy & Waller, 1995). Die ROP wird üblicherweise in der Einheit mm/s angegeben.

Neben der ROP kann die Produktivität beim Hammerbohren auch anhand des abgebauten Untergrundvolumens pro Zeit bewertet werden (Schenk, 1997; Vonnemann, 1977). Die Zielgröße wird auch Bohrleistung genannt und bezieht neben der reinen Bohrgeschwindigkeit auch den Bohrdurchmesser mit ein (Wiedner, 2008).

2.2.2 Umgang mit Störgrößen in Untersuchungen beim Hammerbohren

Eingangsgrößen, die in Untersuchungen nicht gezielt als Faktor verändert werden, können eine Störgröße darstellen. Diese können zufällige oder systematische Effekte auf den Versuch haben. Damit Effekte der Störgrößen nicht mit den Effekten der Faktoren vermischt werden, müssen die Störgrößen entweder konstant eingestellt, kontrolliert oder über den gesamten Versuchsplan vermischt werden. Es ist daher wichtig, alle Parameter zu kontrollieren oder zu randomisieren, die nicht gezielt als Faktoren eingestellt werden. (Siebertz, 2010)

Nach Bruchmueller, Huegel, Wacker und Matthiesen (2018) sind beim Hammerbohren Anwender, Power-Tool und Untergrund in starker physischer Interaktion. Um diese angrenzenden Systeme als Parameter zu beschreiben, kann das Gesamtsystem nach dem IPEK-XiL-Ansatz aufgeteilt werden (Matthiesen, Behrendt, Gwosch, Bruchmueller & Schaefer, 2018). Basierend auf diesem Ansatz, und unter Berücksichtigung der Forschungsergebnisse von Hecker und Riederer (1985), stellte Bruchmüller (2020) die Einflussparameter vor, welche einen Einfluss auf die Vibrationsemission beim Hammerbohren haben. Diese Einflussparameter sind in Abbildung 2.7 aufgeführt.

Wichtige Einflussgrößen auf die Reproduzierbarkeit der Vibrationsmessergebnisse				
Anwender	Bohrhammer	Bohrwerkzeug	Untergrund	Messkette
<ul style="list-style-type: none"> • Greifkraft • Andruckkraft • Größe, Gewicht • Arbeitshaltung 	<ul style="list-style-type: none"> • Leistung • Temperatur • Schlagfrequenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser • Länge • Schneidenform • Wendelgeometrie • Stoßflächenform • Verschleißzustand 	<ul style="list-style-type: none"> • Gesteinsart • Homogenität • Abmessung • Härte 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigungsaufnehmer • Messverstärker • Signalspeicher • Bewertungsfilter • Kalibrierung

Abbildung 2.7: Wichtige Einflussgrößen auf die Reproduzierbarkeit von Vibrationsmessergebnissen (Bruchmüller, 2020; Hecker & Riederer, 1985).

Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission können Zielgrößen derselben Untersuchung sein (Botti et al., 2020; Siebertz, 2010). Bis auf die Spalte Messkette kann jede Einflussgröße auch einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Bohrgeschwindigkeit haben. Die hier vorgestellte systematische Aufteilung der Einflussgrößen hilft dabei die relevanten Parameter als Faktoren für Untersuchungen zu identifizieren. Hierdurch können zur Reduktion der Störeinflüsse geeignete Maßnahmen definiert werden. Im Folgenden werden bekannte Störgrößen für Untersuchungen beim Hammerbohren beschrieben und erläutert, wie diese Störgrößen berücksichtigt wurden.

Störgrößen durch den Bohrhammer

Cronjäger und Jahn (1985) stellten fest, dass die Temperatur des Bohrhammers eine Störgröße in Untersuchungen darstellen kann. Sie führten dieses Verhalten auf eine Änderung der Viskosität des Schmierfettes durch die Temperatur zurück. Es konnte nachgewiesen werden, dass mit steigender Temperatur die Motordrehzahl und damit die Motorleistung steigen kann. Mit der Motordrehzahl ändert sich die Schlagfrequenz und die Drehzahl des Bohrers. In der Studie konnte ein Effekt der Temperatur des Bohrhammers auf die ROP und die Vibrationsemission nachgewiesen werden. Sie zeigten, dass die Änderungsrate der Temperatur, und damit der Störeinfluss, zum Versuchsstart besonders hoch ist. (Cronjäger & Jahn, 1985)

Um Störeinflüsse der Temperatur auf ROP und Vibrationsemission zu reduzieren, schlugen sie vor, Bohrhämmer vor Untersuchungen auf mindestens 90 % der Betriebstemperatur zu bringen (Cronjäger & Jahn, 1985). Bohrhämmer vor dem Start der Untersuchung vorzuwärmen, wird daher auch in der Norm DIN EN ISO

28927-10:2011 zur Ermittlung der Vibrationsemission bei Bohrhämmern aufgeführt. Hier wird vor Beginn der Untersuchung eine Warmlaufphase von ca. 10 Min. gefordert. Auch im Messverfahren EPTA 05/2009 zur Bestimmung der Einzelschlagenergie für Bohrhämmer ist eine Warmlaufphase von 10 Min. spezifiziert. Zusätzlich soll die Umgebungstemperatur für die Untersuchung im Bereich von 15 °C bis 25 °C liegen (Nalbach, 2009).

In den Studien von Uhl (2022) wurde neben einer Warmlaufphase zusätzlich die Temperatur des Bohrhammers kontinuierlich gemessen. Die Zeit zwischen zwei Versuchen wurde so angepasst, dass der Bohrhämmer in einem Temperaturbereich von 80 °C bis 90 °C lag. In diesem Temperaturbereich blieb die Temperatur auch während eines Bohrversuches nahezu konstant. Um den Störeinfluss weiter zu reduzieren, wurde ein randomisierter Versuchsplan verwendet. (Uhl, Gauch, Robens, Gwosch & Matthiesen, 2022; Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023; Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2023)

Der aufgeführte Stand der Forschung zeigt, dass die Temperatur des Bohrhammers eine Störgröße für Untersuchungen beim Hammerbohren darstellen kann. Durch eine Warmlaufphase vor den Untersuchungen, dem kontinuierlichen Messen der Temperatur sowie der Nutzung eines randomisierten Versuchsplans kann der Einfluss dieser Störgröße begrenzt werden.

Störgrößen durch den Bohrer

Für die Untersuchung der Vibrationsemission von Bohrhämmern spezifiziert die Norm DIN EN ISO 28927-10:2011 die Bohrdurchmesser und Bohrlängen. Diese werden in Abhängigkeit des Gewichtes des zu untersuchenden Bohrhammers aufgeführt. Nach Schenk (1997) haben verschiedene Bohrermodelle in ihrer Gestalt, trotz gleichem Bohrdurchmesser und Bohrlänge, einen Effekt auf die Vibrationsemission. Antonucci, Barr, Martin und Rempel (2017) zeigen auf, dass der steigende Verschleiß des Bohrers einen Trendeffekt auf die Vibrationsemission und die ROP hat. Momeni, Moseley, Ante und Allaart (2017) konnten zeigen, dass der Verlauf des Verschleißes abhängig von dem verwendeten Bohrhämmer ist.

Botti et al. (2017) konnten zeigen, dass Bohrerverschleiß einen steigenden Effekt auf die Vibrationsemission und zusätzlich einen sinkenden Effekt auf die ROP hat. In einer darauf aufbauenden Studie wurde der Bohrer daher regelmäßig nach acht gebohrten Löchern gegen einen neuen Bohrer ausgetauscht (Botti et al., 2020).

Uhl et al. (2022) konnten in einer Untersuchung mit 4800 Bohrungen auch zeigen, dass mit steigendem Verschleiß am Bohrer die Vibrationsemission steigt und die ROP absinkt. Der zunehmende Verschleiß konnte mit der kumulierten Bohrtiefe in

Verbindung gebracht werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde in zwei weiteren Studien der Bohrer nach 48 gebohrten Löchern gewechselt. Für die 48 gebohrten Löcher mit einem Bohrer wurden die Faktoren der Untersuchung randomisiert. Mit dieser Blockbildung in der Versuchsplanung konnte der Einfluss des Verschleißes über den gesamten Versuchsplan vermischt werden. (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023; Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2023)

Um Störeinflüsse des Bohrwerkzeugs zu reduzieren, muss für die gesamte Untersuchung beim Hammerbohren das gleiche Modell des Bohrers verwendet werden. Das Modell sollte in Abhängigkeit des Bohrhammergewichtes gewählt werden. Um auch Störeinflüsse durch den Verschleiß des Bohrers zu reduzieren, muss der Bohrer in der Untersuchung regelmäßig gewechselt werden. Untersuchte Faktoren sollten durch Blockbildung über die verwendeten Bohrer randomisiert werden.

Störgrößen durch den Untergrund

In Untersuchungen beim Hammerbohren werden Löcher oft in Beton gebohrt, da dies der häufigsten Anwendung im Baugewerbe entspricht. Auch Beton kann einen Störeinfluss haben. Die DIN EN 206:2021-06 spezifiziert den Baustoff Beton über die Druckfestigkeitsklasse. Beton der Klasse C50/60 hat hier beispielsweise eine charakteristische Mindestfestigkeit in Zylinderform von 50 N/mm² und eine charakteristische Mindestfestigkeit in Würfelform von 60 N/mm². Der Baustoff Beton besteht selbst aus Gesteinen verschiedener Körnung, Wasser und Zement. Die jeweiligen Anteile sind in der DIN EN 206:2021-06 normiert. Durch diese verschiedenen Anteile und Vorzugsrichtungen aus dem Herstellungsprozess kann Beton lokal heterogene Eigenschaften aufweisen, da sich der Gesteinszuschlag nach dem Gießen eher nach unten absetzt. (DIN EN 206:2021-06)

Vonnemann (1977) konnte aufzeigen, dass die ROP beim Hammerbohren mit steigendem Materialwiderstand des Untergrundes sinkt. Cronjäger und Jahn (1985) konnten dies auch für den Untergrund Beton nachweisen. Die erfasste ROP sank beim Hammerbohren mit steigender Druckfestigkeitsklasse des Betons. Auch konnte gezeigt werden, dass die Druckfestigkeitsklasse einen Einfluss auf den a_{nv} -Wert haben kann. Zusätzlich kann eine unzureichende Bohrmehlförderung in der Untersuchung eine Störgröße sein. Hierdurch kann das Lastmoment am Bohrer steigen, wodurch die Motordrehzahl, und damit die Schlagfrequenz, des Bohrhammers sinkt. (Cronjäger & Jahn, 1985; Hecker, 1983b).

Die Norm DIN EN ISO 28927-10:2011 zur Messung der Vibrationsemission bei Bohrhämmern stellt Anforderungen an den Beton. In der Norm werden die Zusammensetzung des Betons und eine Mindestaushärtezeit von 28 Tagen nach

dem Gießen spezifiziert. Auch wird die Mindestgröße des zu bohrenden Untergrundes von 800 mm x 500 mm x 200 mm vorgegeben. Außerdem darf der Betonklotz mit seiner Halterung keine Resonanzfrequenz im Bereich der Resonanz des Hand-Arm-Systems haben, da hierdurch die Messung der Vibrationsemission beeinflusst werden würde. (DIN EN ISO 28927-10:2011)

In den Studien von Uhl et al. (2021) und Uhl et al. (2022) wurden Betonprobekörper entsprechend der Norm DIN EN ISO 28927-10:2011 verwendet. Zusätzlich wurde in der Studie nur Beton aus einer Produktionscharge verwendet. Auch wurde die Position der Bohrlöcher über die Versuchsreihenfolge örtlich randomisiert. Hierdurch werden Effekte des Betons, hervorgerufen aus heterogenen Eigenschaften durch die Gießrichtung, über den gesamten Versuchsplan vermischt.

Da heterogene Betoneinflüsse eine Störgröße für Untersuchungen der Vibrationsemission darstellen, ermöglicht die Norm DIN EN ISO 28927-10:2011 auch die Substitution des Betons. Anstatt eines Bohrers mit definiertem Durchmesser kann ein sogenannter Ersatzuntergrund verwendet werden. Dieser Ersatzuntergrund, genannt *Dynaload*, kann Schläge reproduzierbar dämpfen. Er besteht aus einem Ersatzwerkzeug mit einer SDS-Aufnahme zum Einspannen in den Bohrhammer. Durch dieses Ersatzwerkzeug wird die Energie der Schläge in einen mit Stahlkugeln gefüllten Zylinder eingeleitet. Durch Reibung der Kugeln dissipiert die Energie der Schläge in Wärme. Dies ermöglicht reproduzierbare Bedingungen zur Untersuchung der Vibrationsemission. Der Ersatzuntergrund *Dynaload* ist in Abbildung 2.8 abgebildet.

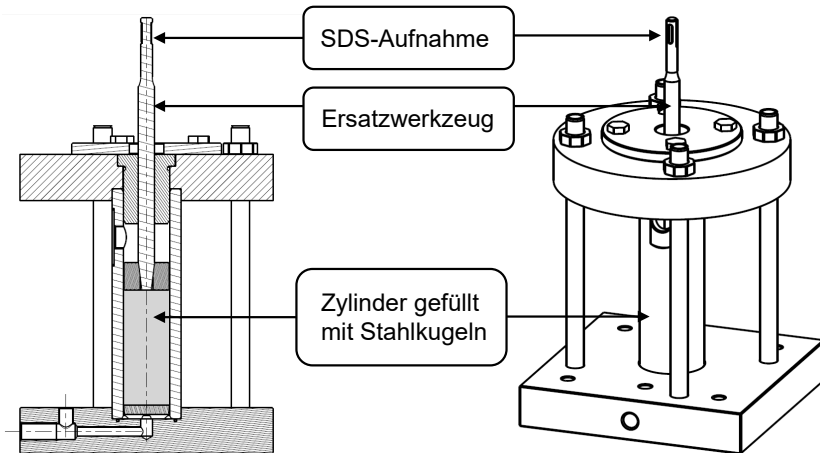


Abbildung 2.8: Ersatzuntergrund *Dynaload* zur reproduzierbaren Dämpfung der Schläge eines Bohrhammers für Vibrationsuntersuchungen.

Der Ersatzuntergrund *Dynaload* kann Schläge dämpfen, jedoch ist dies nur im Meißelmodus eines Bohrhammers möglich. Das Ersatzwerkzeug kann in Untersuchungen mit dem Ersatzuntergrund *Dynaload* kein Bohrmoment aufnehmen. Bruchmüller (2020) stellte einen Ersatzuntergrund vor, welcher auch ein Lastmoment am Ersatzwerkzeug aufnehmen kann. Es konnte gezeigt werden, dass reproduzierbare Vibrationsuntersuchungen hiermit möglich sind. Untersuchungen mit der Zielgröße Bohrgeschwindigkeit sind mit einem Ersatzuntergrund jedoch nicht möglich.

Beton kann durch seine heterogenen Eigenschaften somit eine relevante Störgröße darstellen. Um diese Effekte zu reduzieren, werden an den Beton für Untersuchungen beim Hammerbohren spezielle Anforderungen gestellt, welche in der DIN EN ISO 28927-10:2011 aufgeführt sind. Zusätzlich eignet sich eine örtliche Randomisierung der Bohrlöcher um Störeffekte über den Versuchsplan zu vermischen. Steht der Bohrprozess nicht im Fokus der Untersuchung, so können Bohrer und Beton durch einen Ersatzuntergrund substituiert werden.

Störgrößen durch den Anwender

In Untersuchungen beim Hammerbohren stellt der Anwender selbst eine Störgröße dar. Es konnte gezeigt werden, dass die unterschiedliche physische Beschaffenheit von Anwendern die mechanische Impedanz und hierüber den a_{hv} -Wert beeinflussen

kann (Mangold, 2019; Matthiesen, Mangold & Bruchmueller, 2018). Mit der mechanischen Impedanz können die Schwingungseigenschaften des Hand-Arm-Systems im Frequenzbereich beschrieben werden. Die mechanische Impedanz kann als frequenzabhängiger Widerstand gegen eine Schwingungsanregung interpretiert werden (Lindenmann, Schröder, Germann, Gwosch & Matthiesen, 2022).

Neben der physischen Beschaffenheit der Anwender haben auch die aufgebrachten Kräfte in den Untersuchungen einen Einfluss auf die Impedanz. Cronjäger und Jahn (1985) konnten zeigen, dass eine Erhöhung der Andruckkraft die translatorische Impedanz verändert. Zusätzlich hat auch die Greifkraft einen Einfluss auf die Impedanz. Es konnte gezeigt werden, dass die Greifkraft einen Effekt auf die translatorische Impedanz hat (Burström, 1990, 1997; Jahn, 1985; Lindenmann, 2023). Auch für die rotatorische Impedanz in den drei Achsen des Hand-Arm-Systems nach der ISO 10068:2012-12 haben Greif- und Andruckkräfte einen Einfluss (Lindenmann et al., 2022; Schröder, Lindenmann & Matthiesen, 2023; Schröder, Lindenmann, Resch, Matthiesen & Gwosch, 2023).

Die ISO 10068:2012-12 gibt translatorische Impedanzverläufe des Hand-Arm-Systems für verschiedene Anregungsrichtungen an. Diese Impedanzverläufe der ISO 10068:2012-12 basieren auf verschiedenen Studien (Dong, Welcome, McDowell & Wu, 2006). Da es in diesen Studien unterschiedliche Randbedingungen gab und unterschiedliche Störgrößen auftraten, werden die Verläufe vom Betrag und Phase der Impedanz mit einer Unschärfe angegeben (Lindenmann, 2023). Der Verlauf von Betrag und Phase der Impedanz in z_H -Richtung des Hand-Arm-Systems ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Die z_H -Richtung des Hand-Arm-Systems entspricht der translatorischen Bohrrichtung beim Hammerbohren. (ISO 10068:2012-12)

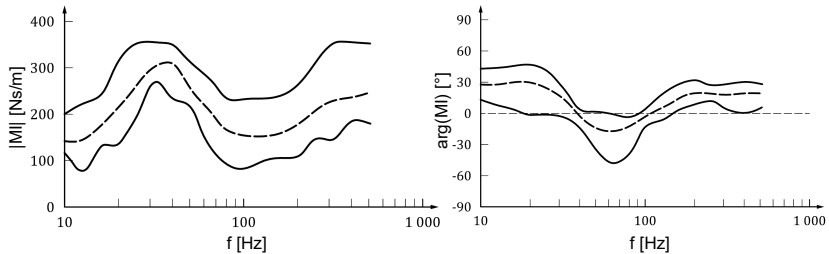


Abbildung 2.9: Betrag (links) und Phase (rechts) der mechanischen Impedanz mit angegebener Unschärfe in z_h -Richtung des menschlichen Hand-Arm-Systems (Lindenmann, 2023 nach ISO 10068:2012-12).

Neben der Impedanz kann auch die Tätigkeit beim Hammerbohren die a_{hv} -Werte beeinflussen. In der Studie von Jahn (1985) wurden für Hammerbohren nach unten etwa 20 % höhere Vibrationen gemessen gegenüber einem horizontalen Hammerbohren. Unterschiedliche Vibrationsemissionen durch unterschiedliche Haltungen des Anwenders konnten in weiteren Studien bestätigt werden (Mangold, 2019; Matthiesen, Mangold et al., 2018).

Eine hohe Streuung haben Anwender in Untersuchungen beim Hammerbohren auch in den aufgebrachtten Kräften. In der Untersuchung von Jahn (1985) hatten verschiedene Anwender hohe Abweichungen bezüglich der Andruckkraft zueinander. Auch für die Greifkraft wurden hohe Unterschiede erfasst. Lindenmann konnte aufzeigen, dass unterschiedliche Greifkräfte beim Hammerbohren einen Einfluss auf den a_{hv} -Wert haben können (Lindenmann, 2023).

Momeni et al. (2017) konnten zeigen, dass beim Hammerbohren neben der Bewegung in Bohrrichtung auch Querbewegungen auftreten können. Uhl, Bruchmüller und Matthiesen (2019) analysierten die Anwenderkräfte genauer. Sie zeigten auf, dass Anwender streuende Andruckkräfte aufbringen und diese einen Einfluss auf die ROP haben. Besonders für das Bohren in einer Überkopfanwendung konnte der systematische Störeinfluss einer sinkenden Andruckkraft über den zeitlichen Verlauf einer Bohrung erfasst werden. Zusätzlich konnte aufgezeigt werden, dass Anwender, ungewollte oder teilweise gewollte, Querkräfte beim Hammerbohren aufbringen. (Uhl et al., 2019)

Zwischenfazit

In diesem Unterkapitel wurde gezeigt, wie in Untersuchungen Störgröße durch den Bohrhämmer, den Bohrer und durch den Untergrund reduziert werden können. Es wurde aufgezeigt, wie der Anwender in Hammerbohrstudien starke Störeinflüsse auf die ROP und den a_{Hv} -Wert hat. Diese Störeinflüsse resultieren aus den unterschiedlichen translatorischen und rotatorischen mechanischen Impedanzen und streuenden Anwenderkräften beim Hammerbohren. Um statistisch aussagefähige Ergebnisse zu erhalten, ist daher eine hohe Probanden- und Versuchsanzahl für Untersuchungen beim Hammerbohren notwendig. Um die Störeinflüsse des Anwenders beim Hammerbohren zu eliminieren, kann der Anwender beim Hammerbohren substituiert werden.

2.2.3 Automatisierte Untersuchungen zur Reduktion von Störgrößen des Anwenders

In diesem Unterkapitel wird vorgestellt, wie der Anwender in Untersuchungen beim Hammerbohren durch automatisierte Prüfstände substituiert werden kann und welche Randbedingungen hierbei beachtet werden müssen.

Für reproduzierbare Untersuchungen der Vibrationsemission beim Hammerbohren substituierten Cronjäger, Jahn und Riederer (1984) den Anwender durch einen Versuchsstand. Das Ziel des Versuchsstandes war es, die Vibrationsbelastung, die Stromaufnahme des Bohrhammers und die Bohrgeschwindigkeit reproduzierbarer untersuchen zu können. In der Studie konnte dem linear gelagerten Bohrhämmer über Gewichte und einer Umlenkrolle eine konstante Andruckkraft vorgegeben werden. Der Versuchsstand war für das senkrechte Hammerbohren nach unten konzipiert. Über den Hauptgriff des Bohrhammers wurde dieser nachgiebig eingespannt. Durch diese nachgiebige Einspannung konnte der Bohrhämmer in translatorischer Richtung schwingen. Für die Einspannung wurden die Feder- und Dämpfungseigenschaften so gewählt, dass das menschliche Hand-Arm-System in den Schwingungseigenschaften beim Hammerbohren nachgebildet wurde. Diese nachgiebige Einspannung wird daher als translatorisches Hand-Arm-Modell bezeichnet. Die Verwendung dieses Hand-Arm-Modells erlaubt die Auswertung der Vibrationsemission, auch in automatisierten Bohrprüfständen. Der Versuchsstand ist in Abbildung 2.10 dargestellt. (Cronjäger et al., 1984)

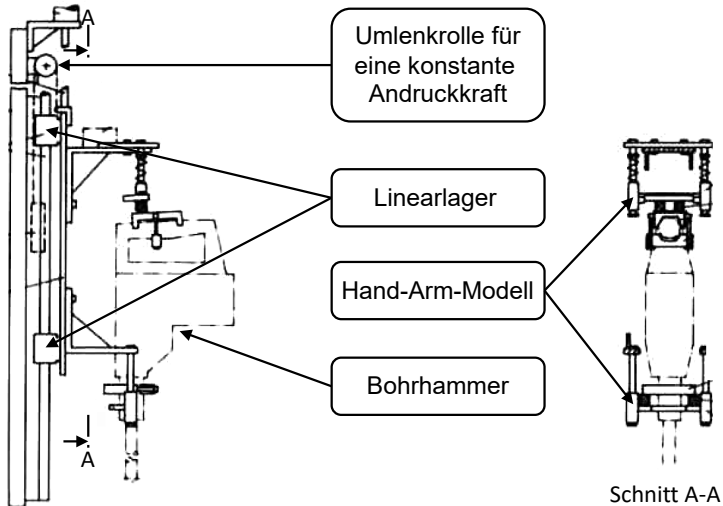


Abbildung 2.10: Versuchsstand nach Cronjäger et al. (1984) mit einem Hand-Arm-Modell zur Substitution des Anwenders für Untersuchungen beim Hammerbohren (angelehnt an Cronjäger et al., 1984).

Basierend auf bekannten Hand-Arm-Modellen und einer schrittweisen Anpassung der jeweiligen Feder- und Dämpfungselemente, wurde das Hand-Arm-Modell eingestellt. Die Feder- und Dämpfungselemente wurden schrittweise verändert, bis die Vibrationsemission des eingespannten Bohrhammers der Vibrationsemission beim manuellen Hammerbohren entsprach. Als Zielgröße wurde hierfür der Effektivwert des frequenzbewerteten Vibrationssignals am Hauptgriff des Bohrhammers verwendet. Das verwendete Hand-Arm-Modell ist daher gültig für die Auswertung des a_{hv} -Wertes bei Bohren nach unten (Cronjäger et al., 1984; Jahn & Hesse, 1986).

Neben dem Hand-Arm-Modell von Cronjäger et al. (1984) und Jahn und Hesse (1986) gibt es im Stand der Forschung weitere Studien, welche Hand-Arm-Modelle für Untersuchungen beim Hammerbohren genutzt haben (Dobry & Barczewski, 1996; Golysheva, Babitsky & Veprik, 2004; Marcotte, Boutin & Jasinski, 2010; Rempel, Barr & Antonucci, 2017).

Mangold (2019) stellte ein einstellbares rotatorisches Hand-Arm-Modell zur Abbildung der passiven heterogenen Anwendereigenschaften um die

Unterarmachse vor. (Mangold, 2019). Für eine Anregung mit 23 Hz konnte damit die passive Eigenschaft des Anwenders abgebildet werden (Mangold, 2019). Lindenmann (2023) stellte ein einstellbares translatorisches Hand-Arm-Modell für Hammerbohren vor. Das Hand-Arm-Modell ist durch Veränderungen von Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften in der mechanischen Impedanz einstellbar (Lindenmann, 2023). Da Greif- und Andruckkräfte einen Effekt auf die Impedanz haben, können diese verschiedenen Kräfte nun durch eine einstellbare mechanische Impedanz wirkungsäquivalent abgebildet werden (Lindenmann, 2023). Das einstellbare Hand-Arm-Modell kann den Menschen beim Hammerbohren über die mechanische Impedanz bis 200 Hz abbilden (Lindenmann, 2023).

Neben der Impedanz sind die Kräfte beim Hammerbohren relevant. Hier definierte Uhl (2022) die Vorschubkraft als Kraft am Bohrer in Vorschubrichtung. Anteile der Kraft am Bohrer, welche nicht in Vorschubrichtung zeigen, definierte er als Querkräfte. Diese Definition ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Für die Bohrrichtung nach unten unterscheidet sich die Vorschubkraft von der Andruckkraft des Anwenders um den Betrag der Hebekraft, wenn keine Querkräfte auftreten. Die Hebekraft entspricht der Gewichtskraft des Bohrhammers. Diese Definition der Vorschubkraft wird in dieser Arbeit verwendet. Die Vorschubkraft entspricht damit dem englischen Begriff der „Feed Force“, wie verwendet von Rempel und Barr et al. (2017) oder Botti et al. (2020), bei gleichzeitig zu 0 N ausgeregelten Querkräften.

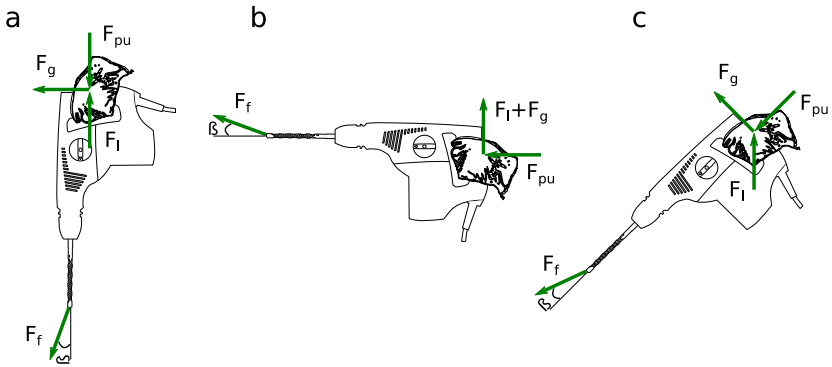


Abbildung 2.11: Definition der Kräfte beim Hammerbohren nach Uhl (2022). Die Vorschubkraft F_f kann Anteile quer zur Bohrrichtung aufweisen. Die Andruckkraft ist als F_{pu} gekennzeichnet (Uhl, 2022).

Uhl (2022) untersuchte den Einfluss von Querkräften beim Hammerbohren. Der automatisierte Bohrprüfstand in den Untersuchungen bestand aus einem kraftgeregelten Industrieroboter mit sechs Achsen und einem Hand-Arm-Modell nach Jahn und Hesse (1986). Er konnte aufzeigen, dass Querkräfte beim Hammerbohren einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit, die Vibrationsemission und den Verschleiß haben können. Damit Querkräfte in Untersuchungen beim Hammerbohren keine Störeinflüsse darstellen, müssen diese daher ausgeglet werden. (Uhl et al., 2022; Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023; Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2023)

Krom, Kloek und Vos (1993) stellten das Konzept eines Bohrroboters für das automatisierte Hammerbohren nach unten vor. Dieser Bohrroboter war kein Prüfstand für Untersuchungen beim Hammerbohren. Er hatte das Ziel, Hammerbohren auf Baustellen zu automatisieren, um die Produktivität der Montage von Eisenbahnschienen zu erhöhen. Der Bohrhammer wurde fest an einen Pneumatikzylinder eingespannt und durch Linearlager geführt. Mit dem Pneumatikzylinder wurde eine Andruckkraft vorgegeben. Zusätzlich wurde die Nachgiebigkeit des Pneumatikzylinders genutzt, um dem Bohrhammer im Bohrbetrieb eine translatorische Bewegung zu ermöglichen. Der Bohrroboter wurde entwickelt, um Löcher für Bolzenanker zu bohren. Über diese Bolzenanker wurden Eisenbahnschienen an einem Betonfundament befestigt. Die Bohrlöcher konnten mit einer Ortstoleranz von ± 2 mm gebohrt werden (Kloek, Bos & Marck, 1994). Für Baustellen entspricht dies einer sehr hohen Toleranz. Automatisierte Bohrprüfstand

können daher eine hohe Ortstoleranz der gebohrten Löcher erreichen. (Kloek et al., 1994; Krom et al., 1993; Krom, 1994)

Ortner und Kromoser (2023) stellten einen automatisierten Bohrprüfstand zur Untersuchung der auftretenden Kräfte und der resultierenden Bohrgeschwindigkeit beim Hammerbohren vor. Die Vibrationsemission wurde nicht untersucht. Der Bohrhämmer wurde in dieser Studie in einen elastischen Endeffektor eingespannt. Dieser elastische Endeffektor entspricht keinem gültigen Hand-Arm-Modell, sodass mit diesem Prüfstand keine Untersuchungen mit der Zielgröße a_{hv} -Wert durchgeführt wurden. (Ortner & Kromoser, 2023)

In einer weiteren Studie mit diesem automatisierten Bohrprüfstand wurde untersucht, ob es Unterschiede bei den Haltekräften von Befestigern zwischen automatisiert und manuell gebohrten Löchern gibt. Für Chemieanker konnte ein gleiches Haltekraftniveau bei geringerer Streuung für automatisiert gebohrte Löcher beobachtet werden. Bei Betonankern wurden nur leicht geringere Haltekräfte beobachtet. Die Autoren schlossen daraus, dass Befestiger für automatisierte und manuell gebohrte Löcher ein vergleichbares Verhalten haben. Mit einem Roboter gebohrte Löcher werden daher als vielversprechender Ansatz angesehen, um Arbeiten im Baugewerbe weiter zu automatisieren (Ortner, Schwenn & Kromoser, 2024)

Zwischenfazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch den Einsatz automatisierter Prüfstände der menschliche Anwender für Untersuchenden beim Hammerbohren substituiert werden kann. Dies reduziert Störgrößen durch den Anwender in den Untersuchungen. Um in diesen Untersuchungen die Vibrationsemission auswerten zu können, muss ein hierfür gültiges Hand-Arm-Modell verwendet werden. Um die Effekte der Anwenderkräfte untersuchen zu können, muss der automatisierte Prüfstand die Kräfte regeln können. Uhl (2022) konnte zeigen, dass neben Andruckkräften auch Querkräfte Effekte beim Hammerbohren haben können. Um Störeinflüsse der Querkräfte zu reduzieren, müssen diese in automatisierten Untersuchungen daher kontrolliert werden.

2.3 Effekte der Anwenderkräfte beim Hammerbohren

Teile der nachfolgenden Inhalte dieses Unterkapitels zur Analyse der Effekte von Anwenderkräften beim Hammerbohren wurden vom Autor der vorliegenden Arbeit in

S. Zimprich, F. Matter, J. Reiser, J.H. Robens, S. Matthiesen, *The effect of feed force on vibration and productivity in hammer drilling: A machine-independent analysis excluding the effect of motor speed reduction*, *International Journal of Industrial Ergonomics* 98 (2023) 103524.
<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103524>.

veröffentlicht. Inhalte werden in großen Teilen unverändert wiedergegeben. Abschnitte des nachfolgenden Textes basieren somit auf der genannten Veröffentlichung und wurden in übersetzter Form übernommen. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wird darauf verzichtet, die Texte gesondert zu kennzeichnen.

Der Anwender kann die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission durch die aufgebrachten Kräfte beim Hammerbohren erheblich beeinflussen. Die Anwenderkräfte sind für Studien beim Hammerbohren daher nicht nur Störgrößen, sondern werden auch als Faktoren gezielt untersucht. Für einen stabilen Bohrbetrieb muss beim Hammerbohren eine Mindestdruckkraft anliegen (Vonnemann, 1977). Auch Änderungen der Anwenderkräfte über diese Mindestdruckkraft hinaus haben einen großen Effekt auf die Zielgrößen beim Hammerbohren. Daher werden diese Anwenderkräfte im Stand der Forschung gezielt untersucht (Botti et al., 2020; Hecker, 1983b; Jahn, 1985; Uhl et al., 2019; Uhl et al., 2022; Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023).

Für die Bohrgeschwindigkeit erwähnte Hecker (1983b) einen positiven Effekt der Vorschubkraft bei Untersuchungen an einem Prüfstand. Er merkte an, dass die ausreichende Bohrmehlförderung über die Wendel des Bohrers ein begrenzender Faktor für die ROP sein kann. Die maximal erreichbare ROP beim Hammerbohren ist daher begrenzt. (Hecker, 1983b)

Schäfer (2018) beobachtete in einer Studie an einem Prüfstand die Tendenz einer sinkenden ROP für steigende Vorschubkräfte beim Hammerbohren im Bereich von 50 N bis 270 N. In der Untersuchung konnte eine Drehzahlrückung des Motors bei steigender Vorschubkraft beobachtet werden. Er erklärte die sinkende ROP bei steigender Vorschubkraft durch ein Absinken der Schlagfrequenz des Bohrhammers. (Schäfer, 2018)

Rempel et al. (2019) bohrten in einer automatisierten Studie Löcher bei einer Vorschubkraft von 88 N. Botti et al. (2017) nutzen in ihrer Studie denselben Prüfstand, jedoch mit einer höheren Vorschubkraft von 150 N. Daher konnten Rempel et al. (2019) die erreichten Bohrgeschwindigkeiten der zwei Studien vergleichen. Für eine Erhöhung der Vorschubkraft von 88 N auf 150 N konnte nur eine geringe Erhöhung der ROP von 9,1 mm/s auf 9,7 mm/s beobachtet werden.

Uhl et al. (2019) untersuchten in einer manuellen Studie die Bohrgeschwindigkeit für verschiedene Bohrrichtungen (vertikal nach oben, horizontal und vertikal nach unten). Für alle Bohrrichtungen konnte ein Anstieg der ROP mit steigender Vorschubkraft festgestellt werden. In der Untersuchung von Botti et al. (2020) konnte in einer automatisierten Studie für eine Vorschubkraft von 90 N bis 180 N eine steigende ROP beobachtet werden. Über einer Vorschubkraft von 180 N änderte sich die ROP kaum. Beide Studien führten in der Diskussion auf, dass Ergebnisse für Untersuchungen beim Hammerbohren von dem verwendeten Bohrhammer und Bohrer abhängig sind (Botti et al., 2020; Uhl et al., 2019). Botti et al. (2020) limitieren daher die Erkenntnisse ihrer Studie. Sie führen auf, dass die Untersuchung mit einem anderen Bohrhammer oder Bohrer zu anderen Erkenntnissen kommen könnten.

Auch Uhl et al. (2021) beobachteten in einer manuellen Studie eine steigende ROP bei steigender Vorschubkraft im Bereich von 100 N bis 200 N. Im Gegensatz zu Botti et al. (2020) konnte jedoch keine Sättigung der ROP bei hohen Vorschubkräften beobachtet werden. In der Studie konnte ein Effekt der Bohrrichtung (Faktorstufen: horizontal und vertikal nach unten) auf die ROP nachgewiesen werden. Die horizontale Bohrrichtung hatte eine signifikant höhere ROP. Die Autoren erklären den Effekt der geringeren ROP durch die erschwerte Bohrmehlförderung für das vertikale nach unten Bohren. Zum einen dämpft Bohrmehl den Stoßkontakt von Bohrer und Beton, wodurch weniger Material ausbrechen kann. Zum anderen erhöht das Bohrmehl auch das Reibmoment zwischen Bohrer und Bohrloch. Hierdurch kann die Motordrehzahl sinken, wodurch auch die Schlagfrequenz sinkt (Hecker, 1983b). (Uhl et al., 2021)

Uhl, Robens, Gauch und Gwosch et al. (2023) untersuchen den Effekt von Vorschub- und Querkräften auf die ROP für zwei verschiedene Bohrhämmer und drei verschiedene Bohrer auf einem automatisierten Prüfstand. Sie untersuchten Vorschubkräfte im Bereich von 80 N bis 230 N und Querkräfte im Bereich von 0 N bis 60 N. Das Niveau und der Verlauf der ROP war in dieser Studie abhängig von dem verwendeten Bohrhammer und dem verwendeten Bohrer. So wurde für Querkräfte bis 20 N eine konstante ROP beobachtet. Querkräfte über 20 N führten zu einer Reduktion der ROP. Für Vorschubkräfte konnte im Bereich von 80 N bis 140 N für alle Bohrhämmer und Bohrer ein Ansteigen der ROP beobachtet werden. Ab einer Vorschubkraft von 140 N konnte, abhängig vom verwendeten Bohrhämmer und Bohrer, entweder ein weiterer Anstieg, ein Abfallen oder ein konstantes Niveau der ROP beobachtet werden (Uhl, 2022). (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023)

In Abbildung 2.12 sind Verläufe der ROP in Abhängigkeit der Vorschubkraft aus verschiedenen Studien aufgeführt. Die vier hier aufgeführten Studien verwendeten

verschiedene Bohrhämmer und Bohrer. Je nach Studie ist entweder ein Absinken der ROP, eine Sättigung der ROP oder ein Anstieg der ROP zu erkennen. (Botti et al., 2020; Schäfer, 2018; Uhl et al., 2021; Uhl, 2022)

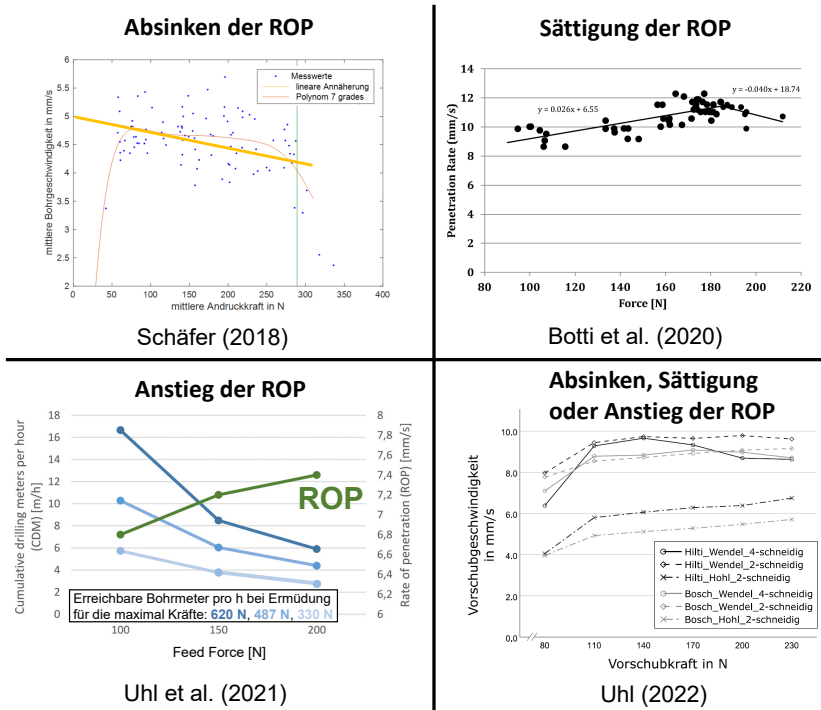


Abbildung 2.12: Unterschiedliche systemspezifische Erkenntnisse zum Effekt der Vorschubkraft auf die ROP. In den Studien wurden verschiedene Bohrhämmer und Bohrer verwendet. Es sind exemplarisch Studien von Schäfer (2018), Botti et al. (2020), Uhl et al. (2021) und Uhl (2022) aufgeführt.

In der Studie von Uhl, Robens, Gauch und Gwosch et al. (2023) konnte aufgezeigt werden, wie korrelierend mit steigender Vorschub- oder Querkraft auch die Schlagfrequenz des Bohrhammers absinkt. Dies ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Die Beobachtung der sinkenden Schlagfrequenz in dieser Studie passt zu der Beobachtung der sinkenden Motordrehzahl in der Studie von Schäfer (2018). Dies zeigt auf, dass der Effekt der Vorschubkraft auf die ROP systemspezifisch vom

verwendeten Bohrhammer, Bohrer und auftretenden Querkräften abhängt. (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023)

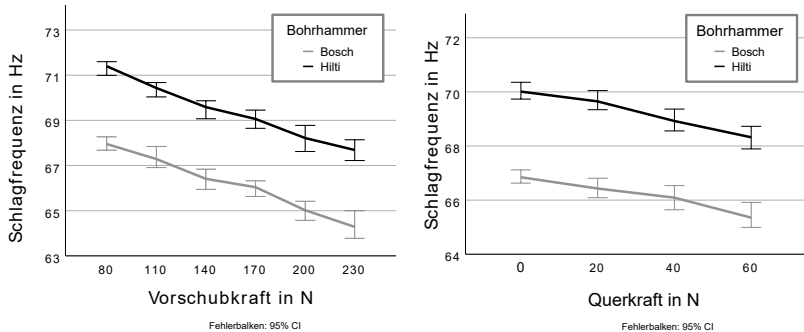


Abbildung 2.13: Systemspezifische Änderung der Schlagfrequenz durch steigende Vorschub- und Querkräfte beim Hammerbohren (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2023).

Studien zur Untersuchung der ROP beim Hammerbohren betrachten oftmals auch den a_{hv} -Wert. Beide Zielgrößen müssen betrachtet werden, um die Vibrationsexposition auf den Anwender reduzieren zu können. Die Vorschubkraft hat neben einem Effekt auf die ROP auch einen Effekt auf den a_{hv} -Wert. Für Vorschubkräfte im Bereich von 100 N bis 200 N konnte für professionelle Anwender gezeigt werden, dass mit steigender Vorschubkraft die ROP und der a_{hv} -Wert am Hauptgriff steigen (Lindenmann et al., 2021; Uhl et al., 2021). Dieser Effekt einer steigenden ROP und Vibrationsemission bei steigenden Vorschubkräften konnte von Uhl et al. (2022) für Untersuchungen mit einem automatisierten Bohrprüfstand bestätigt werden. Mangold (2019) beobachtete beim Hammerbohren in einer Untersuchung mit zwei Anwendern eine steigende Vibrationsemission bei steigender Vorschubkraft. Da Studien zu Hammerbohren unterschiedliche Bohrhammer und Bohrer verwendet haben, ist es jedoch nicht möglich, allgemeinen Aussage über einen Trade-off zwischen der ROP und dem a_{hv} -Wert in Abhängigkeit der Vorschubkraft zu treffen (Cronjäger & Jahn, 1985; Rempel et al., 2019; Schenk, 1997). Für weitere ergonomische Optimierungen des Hammerbohrens müssen Effekte der Vorschubkraft daher besser verstanden werden.

Durch eine Änderung der Vorschubkraft ändert sich auch die Steifigkeit des menschlichen Hand-Arm-Systems und des Bohrhammergriffs (Aldien, Marcotte, Rakheja & Boileau, 2005; Marcotte, Aldien, Boileau, Rakheja & Boutin, 2005). Dies ändert das Schwingungsverhalten des Hand-Arm-Systems beim Hammerbohren.

Zhang et al. (2021) beschrieben einen Effekt der Vorschubkraft auf die Impedanz im Frequenzbereich von 30 Hz – 200 Hz. Gerade in diesem Frequenzbereich liegt beim Hammerbohren auch die Vibrationsanregung durch die Schläge. Ebenso wird dieser Frequenzbereich in der Berechnung des a_{HV} -Wertes berücksichtigt.

Nach Hecker (1983b) und Uhl, Robens, Gauch und Germann et al. (2023) sind die einzelnen Schläge beim Hammerbohren im gemessenen Vibrationssignal zu finden. Jahn (1985) stellte die Schlagfrequenz beim Hammerbohren über eine Änderung der Motorspannung gezielt ein und konnte damit einen Effekt auf die Vibrationsemission zeigen. Die Schlagfrequenz hat damit einen Effekt auf die Vibrationsemission. Die Schlagfrequenz hängt beim Hammerbohren jedoch direkt von der Vorschubkraft ab, da diese systemspezifisch über die Drehzahldrückung des Motors korreliert.

Bruchmueller et al. (2018) untersuchten den Effekt der Vorschubkraft auf den Stoßkontakt zwischen Bohrer und Beton beim Hammerbohren. Der Stoßkontakt wurde in dieser Studie über Stoßzahl beschrieben. Die Stoßzahl beschreibt das Verhältnis der Absolutgeschwindigkeiten der Stoßpartner vor und nach dem Stoß. Die Stoßzahl kann zwischen null und eins liegen. Eine Stoßzahl von eins entspricht einem vollelastischen Stoß, während eine Stoßzahl von null einem vollplastischen Stoß entspricht. Über die Stoßzahl wurde in einer weiteren Studie der Stoßkontakt durch einen Ersatzuntergrund wirkungsäquivalent abgebildet, um so reproduzierbare Vibrationsmessungen zu ermöglichen (Bruchmüller, 2020). In einer Studie am Prüfstand konnte gezeigt werden, dass mit steigender Vorschubkraft beim Hammerbohren die Stoßzahl ansteigt (Bruchmueller et al., 2018). Durch die steigende Vorschubkraft und das hierdurch erhöhte Lastmoment am Bohrer kam es zu einer systemspezifischen Drehzahldrückung des Motors. Hierdurch reduzierte sich auch die Schlagfrequenz und damit der Betriebspunkt des elektropneumatischen Schlagwerks. Es ist daher unklar, welche Effektanteile der steigenden Stoßzahl einer ansteigenden Vorschubkraft und welche Effektanteile einer systemspezifischen Reduktion der Schlagfrequenz zuzuordnen sind.

Erkenntnisse zum Effekt der Vorschubkraft auf die Stoßzahl sind daher nicht über die verwendete Kombination aus Bohrhammer, Bohrer und Untergrund übertragbar. Die Korrelation zwischen Vorschubkraft und Schlagfrequenz ist systemspezifisch. Um einen Bohrhammer daher auf einem Ersatzuntergrund mit wirkungsäquivalenter Stoßzahl reproduzierbar auf die Vibrationsemission untersuchen zu können, müsste dieser zuerst auf die Stoßzahl beim Hammerbohren untersucht werden. Da Ersatzuntergründe jedoch den Versuchsaufwand reduzieren sollen, widersprechen diese zusätzlich notwendigen Untersuchungen dem Sinn eines Ersatzuntergrundes. Durch die Korrelation von Vorschubkraft und

Schlagfrequenz beim Hammerbohren können Erkenntnisse der Stoßzahl für Ersatzuntergründe daher nicht übertragbar erhoben werden.

Zwischenfazit

In diesem Unterkapitel wurden manuelle und automatisierte Studien mit Effekten der Anwenderkräfte auf die Zielgrößen ROP, den a_{HV} -Wert und Stoßzahl diskutiert. Im Fokus der Studien steht oft die Vorschubkraft. Neben dem Effekt der Vorschubkraft auf die Zielgrößen gibt es beim Hammerbohren immer einen zusätzlichen systemspezifischen Effekt durch eine Drehzahldrückung des Bohrhammers. Bisher veröffentlichte Studien haben in der Regel unterschiedliche Bohrhammer und Bohrer verwendet. Daher konnte der Effekt der Vorschubkraft auf Zielgrößen immer nur in Kombination mit überlagerten systemspezifischen Effekten der Drehzahldrückung bestimmt werden. Dies schränkt die Übertragbarkeit von Erkenntnissen der Hammerbohrstudien im Stand der Forschung ein. Für den Effekt der Vorschubkraft auf die ROP gibt es teils divergierende Ergebnisse, jeweils abhängig vom untersuchten System aus Bohrhammer und Bohrer. So ist der systemunabhängige Effekt der Vorschubkraft auf die ROP und den a_{HV} -Wert unbekannt. Effekte der Vorschubkraft konnten bisher nur vermischt mit dem Effekt einer systemspezifisch korrelierenden Drehzahldrückung bestimmt werden. Daher ist auch unbekannt, wie groß die jeweiligen Effektanteile von Vorschubkraft und Drehzahldrückung auf die ROP und den a_{HV} -Wert sein können.

2.4 Effekte des Bohrhammers beim Hammerbohren

Teile der nachfolgenden Inhalte dieses Unterkapitels zur Analyse der Effekte des Bohrhammers beim Hammerbohren wurden vom Autor der vorliegenden Arbeit in

S. Zimprich, J. Reiser, F. Matter, J.H. Robens, S. Matthiesen, Optimizing Drilling Parameters: A Novel Cyclical Motor Control Concept to Adjust the Impact Energy Independently of the Frequency for Impact Mechanisms, (Zimprich, Reiser, Matter, Robens & Matthiesen, 2026)

veröffentlicht. Inhalte werden in großen Teilen unverändert wiedergegeben. Abschnitte des nachfolgenden Textes basieren somit auf der genannten Veröffentlichung und wurden in übersetzter Form übernommen. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wird darauf verzichtet, die Texte gesondert zu kennzeichnen.

Neben der Schlagfrequenz hat auch die Einzelschlagenergie beim Hammerbohren einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit. Wiedner (2008) zeigte, dass das abgebaute Untergrundvolumen, auch Bohrleistung genannt, bei konstanter Schlagleistung abhängig ist vom Bohrdurchmesser. Die Schlagleistung ist das Produkt aus Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie. Für eine konstante Schlagleistung gibt es einen Bohrdurchmesser mit optimaler Bohrleistung. Eine Erhöhung der Bohrleistung durch eine Steigerung der Einzelschlagenergie verschiebt dieses Optimum hin zu größeren Bohrdurchmessern. Bei Erhöhung der Bohrleistung durch eine Steigerung der Schlagfrequenz steigt die Bohrleistung, wobei das Optimum bei dem gleichen Bohrdurchmesser bleibt. Dies ist in Abbildung 2.14 dargestellt. (Wiedner, 2008)

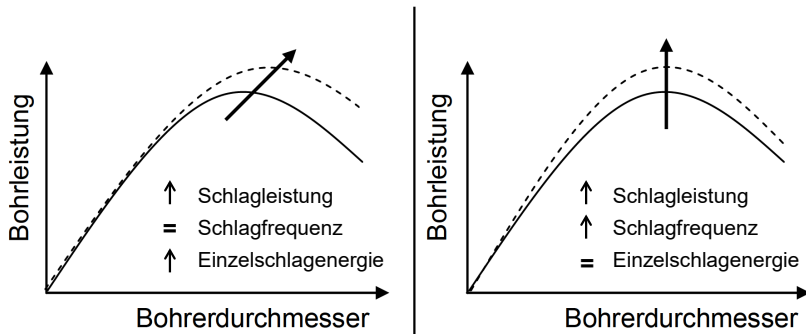


Abbildung 2.14: Änderung der Bohrleistung bei konstanter Schlagleistung durch eine Änderung der Schlagfrequenz oder einer Änderung der Einzelschlagenergie nach Wiedner, 2008.

Die ROP beim Hammerbohren mit kleinem Bohrdurchmesser kann daher durch eine Erhöhung der Schlagfrequenz gesteigert werden. Für eine Steigerung der ROP beim Hammerbohren mit größerem Bohrdurchmesser ist hingegen eine Steigerung der Einzelschlagenergie zielführender.

Vonnemann (1977) erklärte dies über das Verhältnis des Energieeintrags in den Untergrund zur Schneidebreite pro Schlag. Hierfür analysierte er die Größe der Körner im Bohrmehl. Bei kleinen Bohrdurchmessern führt eine Steigerung der Energie pro Schneidenbreite zu absinkenden Korngrößen im Bohrmehl, da das Verhältnis über einem Schwellwert liegt. Dies senkt den Wirkungsgrad des Hammerbohrens und erschwert die Bohrmehlförderung. Bei einer Erhöhung der Schlagleistung durch eine höhere Schlagfrequenz können mehr Schläge pro Zeitintervall zum Bohrfortschritt beitragen. Mit der Schlagfrequenz steigt bei

konventionellen Bohrhämmern zusätzlich die Bohrdrehzahl, was die Bohrmehlförderung begünstigt. Bei größeren Bohrdurchmessern hingegen liegt das Verhältnis von Energie pro Schneidenbreite unter dem Schwellwert. Mit steigender Einzelschlagenergie steigt die Eindringtiefe des einzelnen Schlages an. Hierdurch kann mehr Untergrund zertrümmert werden, wodurch die ROP ansteigt. Für eine hohe Bohrgeschwindigkeit beim Hammerbohren sind für verschiedene Durchmesser daher verschiedene Schlagfrequenzen und Einzelschlagenergien optimal. (Vonnemann, 1977)

Mit gesteigerter Einzelschlagenergie kann beim Hammerbohren die ROP gesteigert werden. Daher ist die Einzelschlagenergie eine gängige Zielgröße bei Optimierungen und Untersuchungen elektropneumatischer Schlagwerke. Todorov et al. (2010) änderten die Gestaltparameter eines elektropneumatischen Schlagwerks zur Optimierung der Einzelschlagenergie. Es wurden verschiedene Massenverhältnisse und Geometrieparameter der einzelnen Schlagwerkskomponenten variiert, um hierdurch die dynamische Abstimmung zu verändern. Dabei konnte eine Verbesserung der Einzelschlagenergie von weniger als 10 % erzielt werden. Sie stellen fest, dass es bei bestimmten Schlagfrequenzen verschiedene Optima bestimmter Gestaltparameter für eine hohe Einzelschlagenergie gibt (Todorov et al., 2010). Auch in einer Studie von Babitsky (1998) wurde festgestellt, dass Effekte der variierten Gestaltparameter auf die Einzelschlagenergie stark nichtlinear sind. (Todorov et al., 2010)

In einer Studie von Yan et al. (2016) wurde die Kinematik des elektropneumatischen Schlagwerks simulativ untersucht, um die Einzelschlagenergie zu erhöhen. Basierend auf der simulativen Untersuchung wurden drei verschiedene Optimierungsmöglichkeiten vorgeschlagen und als Prototypen umgesetzt. Die Bohrhämmer mit diesen drei optimierten elektropneumatischen Schlagwerken wurden in einer Studie auf die Bohrgeschwindigkeit beim Hammerbohren untersucht. Durch die Optimierung konnte eine Steigerung der ROP von weniger als 5 % erreicht werden. (Yan et al., 2016)

Neben der Änderung fester Gestaltparameter gibt es grundsätzlich drei Methoden, um die Einzelschlagenergie elektropneumatischer Schlagwerke zu ändern. Bei der ersten Methode können Leckagen der Luftfeder durch einstellbare Öffnungen gezielt verändert werden. Dies senkt den Druck der Luftfeder und damit die auf den Flugkolben wirkende Kraft. Die nicht starre Kopplung zwischen dem Antriebskolben und dem Flugkolben wird also gezielt verändert, um damit die dynamische Abstimmung im Schlagwerk zu beeinflussen. Hierdurch kann bei konstanter Schlagfrequenz die Einzelschlagenergie abgesenkt werden. In der zweiten Methode wird die Länge des Pleuels einstellbar ausgeführt. Dies verändert den Hub des

Kolbens, wodurch sich auch die dynamische Abstimmung im Schlagwerk ändert. Bei geringerem Kolbenhub wird beispielsweise der Flugkolben weniger stark beschleunigt, sodass die Einzelschlagenergie geringer ist. Diese zwei Methoden benötigen jedoch zusätzliche Bauteile und sind mechanisch aufwendig. Daher finden diese keine Verbreitung in kommerziellen Bohrhämmern. (Würsch, Schmitzer & Schaer, 2004)

Die dritte und in kommerziellen Bohrhämmern gängigste Methode ist die Änderung der Motordrehzahl. Mit der Motordrehzahl ändert sich die Schlagfrequenz. Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie korrelieren in elektropneumatischen Schlagwerken stark (Todorov et al., 2010). So kann die Schlagfrequenz gezielt abgesenkt werden, um damit beispielsweise die Einzelschlagenergie für ein sanftes Anbohren zu reduzieren. Eine Erhöhung der Schlagfrequenz hingegen erhöht auch die Einzelschlagenergie. Dies ist jedoch nur bis zu einer Grenzfrequenz möglich. Wird diese zu hoch gewählt, so bewegt sich der Antriebskolben in einem überkritischen Betrieb vor und zurück, ohne dass jedoch der Flugkolben mitbewegt wird und Schläge erzeugt werden (Wiedner, 2008). Eine Erhöhung der Schlagfrequenz zur Steigerung der Einzelschlagenergie ist daher nur begrenzt möglich. (Würsch et al., 2004)

Die gängige Methode zur Änderung der Einzelschlagenergie eines Bohrhammers ist somit die Änderung der Schlagfrequenz. Dies geschieht durch die Änderung der Motordrehzahl, mit welcher das Schlagwerk angetrieben wird. Durch die hierdurch veränderte dynamische Abstimmung im Schlagwerk kann die Geschwindigkeit des Flugkolbens zum Schlagzeitpunkt und damit auch die Einzelschlagenergie erhöht werden. Nur so kann beim Hammerbohren die Einzelschlagenergie ohne zusätzliche mechanische Bauteile alleine durch die Motoransteuerung geändert werden, wobei sich aber auch die Schlagfrequenz mit ändert (Würsch et al., 2004). Um verschiedene Untergründe bei verschiedenen Bohrdurchmessern zu bohren, sind jedoch verschiedene Kombinationen von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie optimal (Vonnemann, 1977). Die starke Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie behindert damit die Einstellung optimaler Parameterkombinationen bei Hammerbohren.

Auch in Untersuchungen weiterer schlagender Bohrverfahren kann die Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie ein Problem darstellen. In einer Studie für Senkbohrhämmer haben Liu, Chang, Li und Cheng (2017) für die Faktoren Einzelschlagenergie, Bohrdrehzahl, Vorschubkraft, Einzelschlagenergie und Bohrermodell Effekte auf die Bohrgeschwindigkeit untersucht. Das untersuchte System ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Senkbohrhämmer werden beim sogenannten Imlochhammerbohren zum Bohren von großen Durchmessern in

hartem Gestein für Erdwärmesonden oder Brunnenbohrungen verwendet. Das Schlagwerk wird nicht durch einen Motor, sondern direkt durch Druckluft angetrieben. Diese Schlagwerke sind den elektropneumatischen Schlagwerken daher ähnlich. In der Limitierung der Studie erklärten Liu et al. (2017), dass die unabhängige Einstellung der Faktoren Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie in der experimentellen Untersuchung ein Problem darstellte. Hierdurch konnten einige simulativ gewonnenen Erkenntnisse nicht experimentell bestätigt werden. Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie konnten zwar in der Simulation unabhängig eingestellt werden, jedoch nicht experimentell. Dies zeigt, dass die Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie in Untersuchungen zur Optimierung schlagender Bohrprozesse ein Hindernis darstellt. (Liu et al., 2017)

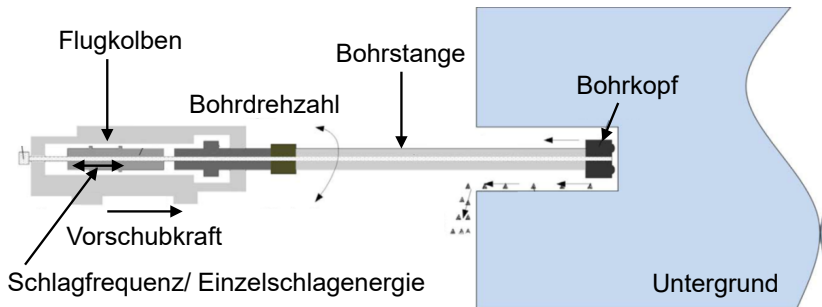


Abbildung 2.15: Untersucher Senkbohrhammer beim Imlochhammerbohren nach Liu et al. (2017).

Der Umsetzwinkel beschreibt beim Hammerbohren den Winkelversatz des Bohrers zwischen zwei Schlägen und hat einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit (Hecker, 1983a; Vonnemann, 1977). In kommerziellen Bohrhämmern korreliert die Schlagfrequenz mit der Bohrdrehzahl, da diese über ein mechanisches Getriebe gekoppelt sind. Auch bei sich ändernder Schlagfrequenz bleibt der Umsetzwinkel hierdurch konstant. Frey et al. (2003) variierten in einer Studie den Umsetzwinkel, um damit die Bohrgeschwindigkeit zu optimieren. Für diese Studie wurde ein Bohrrhammer als Untersuchungsumgebung modifiziert. Dieser konnte die Schlagfrequenz und die Bohrdrehzahl getrennt einstellen, um hierdurch den Umsetzwinkel zu verändern. Anstatt von einem Motor wurden das elektropneumatische Schlagwerk und der Drehantrieb jeweils von einem eigenen Motor angetrieben. In Bohrversuchen wurde der Umsetzwinkel durch eine Änderung von Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl bei verschiedenen Vorschubkräften und Untergründen über ein selbstlernendes neuronales Netz automatisch angepasst, um die Bohrgeschwindigkeit zu maximieren. Das Konzept der Studie, zusammen

mit dem verwendeten Bohrhämmer mit getrenntem Antriebsstrang als Untersuchungsumgebung, ist in Abbildung 2.16 dargestellt. Effektgrößen der Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl wurden in dieser Studie nicht bestimmt. Diese Studie zeigt jedoch, dass ein Bohrhämmer mit getrenntem Antriebsstrang als Untersuchungsumgebung in der Lage ist, Korrelationen der Schlagfrequenz aufzulösen. (Frey et al., 2003)

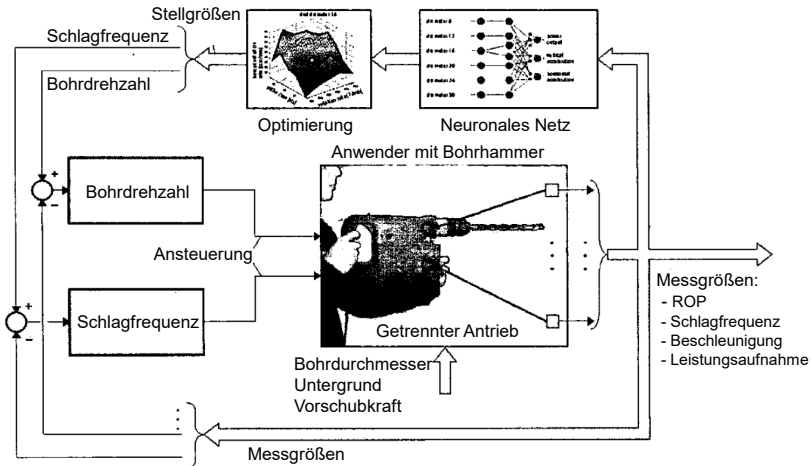


Abbildung 2.16: Bohrhämmer mit getrenntem Antriebsstrang für Bohrdrehzahl und Schlagfrequenz als Untersuchungsumgebung. Bohrdrehzahl und Schlagfrequenz wurden mit einem neuronalen Netz zur Optimierung der Bohrgeschwindigkeit automatisch angepasst (nach Frey et al., 2003).

Durch Weiterentwicklungen im Bereich der Akkutechnologie und Elektromotoren steigt die erreichbare Leistungsdichte für Antriebe in Power-Tools stetig an. So gibt es seit kurzem Bohrhämmer auf dem Markt, welche mit einer einstellbaren und konstanten Motordrehzahl werben. Der Robert Bosch Power Tools GmbH hat hier beispielsweise das Modell „Bosch GBH 18V-26“ im Sortiment (Robert Bosch GmbH, o. D.). Es ist jedoch unbekannt, inwieweit die Motordrehzahl, und damit die Schlagfrequenz und die Einzelschlagenergie, bei steigendem Lastmoment auch wirklich konstant gehalten werden kann. Daher ist weiterhin unbekannt, wie groß die jeweiligen Effektanteile von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie in Bohrhämmerstudien auf die ROP und den a_{HV} -Wert sein

können. In bisherigen Studien wurden keine Bohrhämmer mit einer konstant angegebenen Motordrehzahl verwendet.

Zwischenfazit

In diesem Unterkapitel wurde aufgezeigt, dass für schlagende Bohrverfahren unterschiedliche Kombinationen der Parameter Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie für eine hohe Bohrgeschwindigkeit optimal sind. Jedoch korrelieren Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren stark. Dies verhindert, dass optimale Einstellungen der Parameter zum Bohren von verschiedenen Untergründen und Bohrdurchmessern verwendet werden können. Zusätzlich erschwert die Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie die Untersuchung schlagender Bohrverfahren.

2.5 Ansätze von zyklischen Ansteuerungen für Motoren

Wie in Kapitel 2.1.3 aufgeführt, erzeugen elektropneumatische Schlagwerke ein mit der Schlagfrequenz zyklisches Lastmoment (Bruchmüller, 2020; Riederer, 1985). Das Lastmoment schwankt somit periodisch mit jeder Umdrehung der Kurbel zum Antrieb des Pleuels. In Kapitel 2.4 wurden Möglichkeiten zur Änderung der dynamischen Abstimmung im Schlagwerk aufgeführt, wie etwa eine Änderung der Schlagfrequenz oder der Variation von Gestaltparametern im Schlagwerk. Eine Änderung der dynamischen Abstimmung ist möglich, da es zwischen dem Antriebskolben und dem Flugkolben keine starre Kopplung gibt. Die Geschwindigkeit des Flugkolbens zum Schlagzeitpunkt und damit auch die Einzelschlagenergie können daher geändert werden.

Kombiniert man die Erkenntnisse der Unterkapitel 2.1.3 und 2.4 und führt neben einem zyklischen Lastmoment auch ein zyklisches Antriebsmoment ein, so kommt man zu dem Schluss, dass ein zyklisches Antriebsmoment für elektropneumatische Schlagwerke die dynamische Abstimmung beeinflussen könnte. Hierdurch würde sich die Geschwindigkeit des Flugkolbens zum Schlagzeitpunkt und damit auch die Einzelschlagenergie ändern. In diesem Unterkapitel werden daher Studien mit Ansätzen zu zyklischen Motoransteuerungen in Antriebssträngen mit einer nicht starren Kopplung im Leistungsfluss aufgeführt.

2.5.1 Untersuchungen für Schlagschrauber

Bohrhämmer erzeugen translatorische Schläge, damit beim Bohren Material aufgeschlagen wird. Dies erreicht hohe Bohrgeschwindigkeiten, auch in harten

Baustoffen. Tangential-Schlagschrauber sind Power-Tools zur Montage von Schraubverbindungen mittels rotatorischer Schläge. Die Montage einer Schraubverbindung mit einem Schlagschrauber kann hohe Vorspannkkräfte und kurze Montagezeiten erreichen. Der Anwender muss dabei durch die kurze Dauer der Schläge keine hohen statischen Momente abstützen.

In einem Tangential-Schlagschrauber wird ein Hammer über einen Motor angetrieben. Der Hammer schlägt auf einen Amboss, um damit die Schläge zu erzeugen. Diese Schläge werden vom Amboss über eine Nuss auf die Schraubverbindung aufgebracht. Im Antriebsstrang sind der Motor und der Amboss nicht fest verbunden. Der Hammer ist über eine V-Nut in der Motorwelle gelagert und wird durch eine Schraubendruckfeder gegen die Spitze der V-Nut vorgespannt. Nach einem Schlag verspannt sich der Hammer gegen den Amboss. Die Motorwelle dreht sich dabei weiter, wodurch der Hammer in der V-Nut nach unten geschoben wird und die Vorspannung der Schraubendruckfeder steigt. Erreicht die Vorspannung einen gewissen Wert, so überspringt der Hammer und schlägt erneut auf den Amboss (Wettstein, Grauberger & Matthiesen, 2021). Mit jedem Schlag des Tangential-Schlagschraubers steigt die Vorspannkraft in der Schraubverbindung (Wallace, 2015). Das Schlagwerk eines Tangential-Schlagschraubers mit V-Nut ist in der Abbildung 2.17 dargestellt.

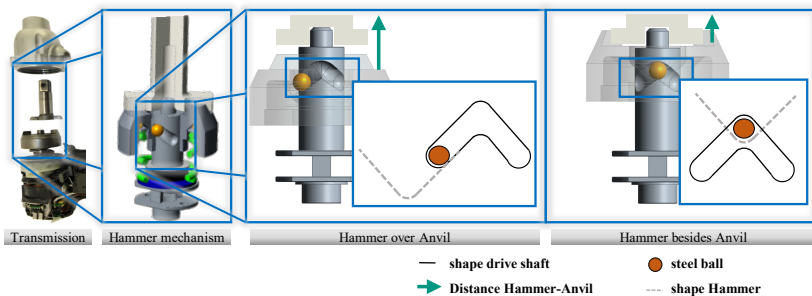


Abbildung 2.17: Schlagwerk mit V-Nut eines Tangential-Schlagschraubers zur Erzeugung von rotatorischen Schlägen (Wettstein et al., 2021).

Auch für Tangential-Schlagschrauber kann der einzelne Schlag über dessen Energie bewertet werden (Sieling, 1977; Wallace, 2015). Die Energie des einzelnen Schläges steigt für Tangential-Schlagschrauber mit der Schlagfrequenz, da der Hammer mit höherer Geschwindigkeit und damit auch höherer kinetischer Energie auf den Amboss trifft (Sieling, 1977). Mit der Energie der einzelnen Schläge steigt auch das erreichbare Anzugsmoment. Das erreichbare Anzugsmoment eines

Schlagschraubers kann daher oftmals über eine Einstellung der Motordrehzahl variiert werden, wodurch auch die Schlagfrequenz steigt (Wettstein, 2021). Die Energie der einzelnen Schläge und damit das erreichbare Anzugsmoment korrelieren daher mit der Schlagfrequenz bei Tangential-Schlagschrauben.

Wettstein, Kretschmer und Matthiesen (2020) untersuchten den Effekt verschiedener Motordrehzahlen und Schmiermitteln auf die Unterkopf- und Gewindereibkoeffizienten einer Schraubverbindung im schlagenden Anziehprozess. Sie schlussfolgern aus den experimentellen Untersuchungen, dass die Motordrehzahl einen Effekt auf die Reibkoeffizienten hat (Wettstein et al., 2020). Eine Änderung der Motordrehzahl änderte in der Untersuchung die Schlagfrequenz und auch die Energie der Schläge des Tangential-Schlagschraubers. Es ist daher unklar, wie groß die jeweiligen Effektanteile von Schlagfrequenz und der Energie der einzelnen Schläge auf die Reibkoeffizienten sind.

Zur Auflösung der Korrelation von Schlagfrequenz und der Energie der einzelnen Schläge bei Tangential-Schlagschraubern schlagen Lee, Ko, Chun und Hur (2013) eine sinusförmige Motordrehzahl vor. Diese sinusförmige Motordrehzahl ist in Abbildung 2.18 im Vergleich zu einer konstanten Motordrehzahl gezeigt. Der Ansatz sieht vor, die Drehzahl des Motors so zu variieren, dass die Minimaldrehzahl bei 0 U/min liegt. Die Maximaldrehzahl soll im Vergleich zu einer konstanten Drehzahl bei der doppelten Drehzahl liegen. Hierdurch ergibt sich über einen Schlagzyklus gemittelt die gleiche Drehzahl wie bei einer rein konstanten Drehzahl. Die Idee hinter diesem Konzept basiert darauf, dass durch den ungleichförmigen Antrieb und die nicht starre Kopplung von Motor und Hammer die Winkelgeschwindigkeit des Hammers zum Schlagzeitpunkt nicht alleinig durch die Federvorspannung bestimmt wird. Durch die nicht starre Kopplung zwischen Motor und Hammer wird die Winkelgeschwindigkeit des Hammers zum Schlagzeitpunkt zusätzlich nun auch mit der zum Schlagzeitpunkt temporär höheren Motordrehzahl überlagert. (Lee et al., 2013)

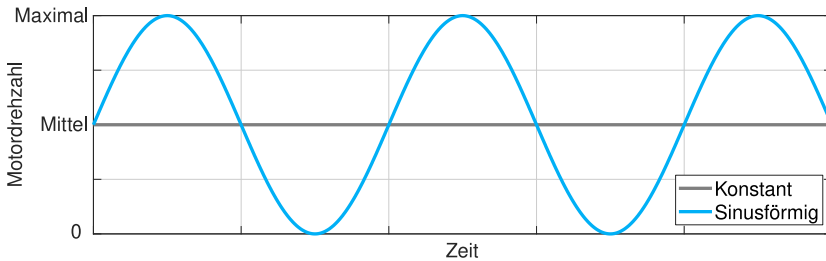


Abbildung 2.18: Vorgabe einer sinusförmigen Motordrehzahl (blau) nach Lee et al. (2013) zur Auflösung der Korrelation von Schlagfrequenz und Energie der Schläge bei Tangential-Schlagschraubern. Diese ist im Vergleich zu einer konstanten Motordrehzahl aufgetragen. Beide Motordrehzahlen erreichen die gleiche Schlagfrequenz.

Eine Auflösung der Korrelation würde zu einem höheren Anzugsmoment bei gleichbleibender Schlagfrequenz ermöglichen. Zum anderen könnte das Anzugsmoment für kleinere Schraubdurchmesser gezielt abgesenkt werden, ohne jedoch eine höhere Montagezeit durch eine geringere Schlagfrequenz in Kauf nehmen zu müssen. Durch die Vorgabe der sinusförmigen Motordrehzahl mit einer Minimaldrehzahl von 0 U/min konnte mithilfe einer Mehrkörpersimulation gezeigt werden, dass bei konstanter Schlagfrequenz ein Effekt auf das Drehmoment des Tangential-Schlagschraubers erzielt werden kann. (Lee et al., 2013)

Eine experimentelle Validierung der zyklischen Motoransteuerung zur Auflösung der Korrelation von Schlagfrequenz und Energie der Schläge wurde in der Studie angekündigt (Lee et al., 2013). Jedoch wurde eine solche Validierung bis jetzt noch nicht veröffentlicht. Es wird vermutet, dass die Regelung einer sinusförmigen Motordrehzahl mit einer Minimaldrehzahl von 0 U/min im Antriebsstrang eines Tangential-Schlagschraubers nicht möglich ist. Die Machbarkeit dieses Ansatzes in der beschriebenen Form für Tangential-Schlagschrauber wird daher angezweifelt.

2.5.2 Experimentelle Untersuchungen zur zyklischen Ansteuerung von Flugdrohnen

Zyklische Motoransteuerungen sind auch für die Steuerung von Flugdrohnen bekannt. So müssen Fluggeräte wie Helikopter oder Flugdrohnen in sechs Freiheitsgraden steuerbar sein. Flugdrohnen wie Quadrocoptern steuern hierfür die vier Rotoren gezielt an. Helikopter hingegen nutzen am Hauptrotor für die Nick-Bewegung eine zyklische, auch rotationsperiodisch genannte, Rotorblattverstellung

mithilfe einer Taumelscheibe. Die Nick-Bewegung wird im Englischen auch „pitch“ genannt.

Paulos und Yim (2013) ersetzen für eine Flugdrohne mit zwei Rotoren die Funktion der Taumelscheibe durch eine zyklische Ansteuerung der Rotoren in Kombination mit einer neuen Bauart der Rotoren. Diese Bauart ist in Abbildung 2.19 dargestellt. Die Rotorblätter sind hier nicht fest mit der Rotornabe verbunden. Durch die Gelenke können die Rotorblätter verkippen, wenn die Rotornabe den Rotorblättern vor- oder nachheilt. Durch das zyklisch in Abhängigkeit des Motorwinkels geregelte Motormoment eilt die Rotornabe vor- oder nach. Eilt die Rotornabe den Rotorblättern vor, so verstellt sich das eine Rotorblatt nach hinten (links in Abbildung 2.19), während sich das andere Rotorblatt nach vorne neigt (rechts in Abbildung 2.19). Eilt die Rotornabe nach, so verstellen sich die Rotorblätter in die andere Richtung. Durch diese ungleiche Rotorblattverstellung wird ein Kippmoment erzeugt, welches zum Steuern der Flugdrohne genutzt wird.

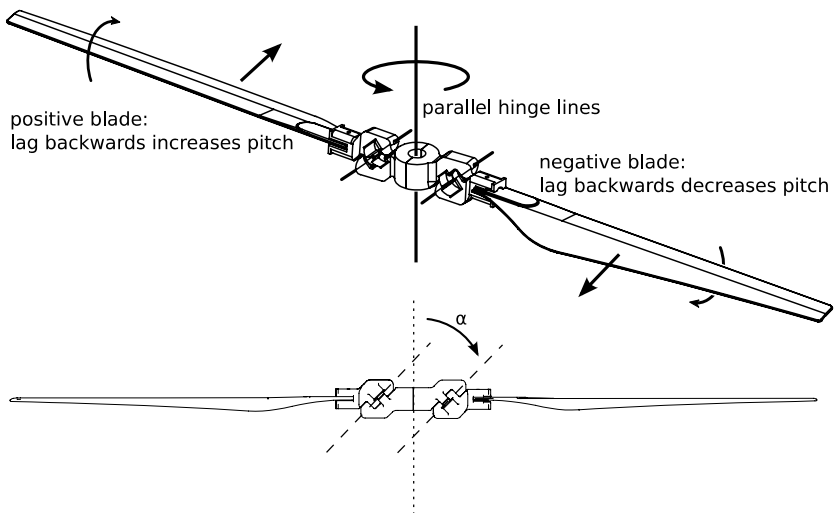


Abbildung 2.19: Die nicht starre Kopplung mit einer zyklischen Ansteuerung ermöglichte die Nick-Bewegung (Paulos & Yim, 2013).

Für die Steuerung der Flugdrohne muss die aktuelle Position des Rotors bekannt sein. Da die Position nicht direkt mit dem verwendeten Motor bestimmt werden konnte, wurde die Rotorposition zusätzlich mit einem Encoder bestimmt. Da die Position des Rotors bekannt ist, kann die zyklische Ansteuerung in der Phase, also

über den Motorwinkel, verschoben werden. Hierdurch kann gezielt das Verkippen um die x- oder y-Achse der Flugdrohne angesteuert werden. In ersten Flugversuchen konnte gezeigt werden, dass die Flugdrohne mit zwei Rotoren in allen sechs Freiheitsgraden manövrierfähig ist. (Paulos & Yim, 2013)

Dieses Konzept wurde bezüglich unterschiedlicher Gewichtsverteilung und Leistungsaufnahme der Flugdrohne weiter untersucht (Paulos & Yim, 2015). Die in dieser Studie aufgeführte zyklisch angesteuerte Rotorfrequenz beträgt 40 Hz (Paulos & Yim, 2015). 40 Hz liegt im Bereich gängiger Schlagfrequenzen beim Hammerbohren. In einer weiteren Studie wurde die Regelung der Drohne simulativ untersucht und durch den Abgleich mit Versuchsdaten weiter optimiert (Paulos & Yim, 2018). In Versuchen konnte gezeigt werden, dass Flugbahnen bei gleichzeitig definierter räumlicher Orientierung der Flugdrohne geflogen werden können (Paulos, Caraher & Yim, 2018). Dies demonstriert, dass die Steuerung der sechs Freiheitsgrade einer Flugdrohne durch nur zwei Rotoren mit zyklischer Motoransteuerung möglich ist.

2.6 Fazit zu Grundlagen und Stand der Forschung

Hammerbohren ist ein schlagender Bohrprozess zum Bohren von Löchern in harten Baustoffen wie Beton. Die Löcher werden in der Regel manuell von Anwendern mit Bohrhämmern und geeigneten Bohren gebohrt. In weiteren Arbeitsschritten werden in diesen Löchern Befestigungsmittel montiert. Untersuchungen und Optimierungen beim Hammerbohren können das Ziel haben, die Produktivität zu erhöhen oder die auf den Anwender wirkende schädliche Vibrationsexposition zu verringern. Die hieraus abgeleiteten Zielgrößen zur Bewertung von Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission sind die ROP und der a_{hv} -Wert.

Störgrößen in den Untersuchungen können aus dem Bohrhammer, dem Bohrer, dem Untergrund oder dem Anwender kommen. Durch geeignete Maßnahmen können diese Störgrößen minimiert werden. In Untersuchungen im analysierten Stand der Forschung wird beispielsweise regelmäßig der Bohrer gewechselt oder es wird eine Warmlaufphase des Bohrhammers durchgeführt. Durch randomisierte Versuchspläne werden Störgrößen über den gesamten Versuchsplan vermischt. Der Anwender hat durch streuende mechanische Impedanzen und streuende Anwenderkräfte in den Untersuchungen einen starken Störeinfluss. Um diese Störgrößen zu eliminieren, wird der Anwender in Untersuchungen oft durch automatisierte Prüfstände und mechanische Ersatzmodelle substituiert.

Studien im Stand der Forschung konnten aufzeigen, dass die Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission haben. Es wurde aufgezeigt, dass bei Studien zum Hammerbohren die Schlagfrequenz mit der Vorschubkraft durch eine Drehzahldrückung des Motors systemspezifisch korreliert. Auch wurde aufgezeigt, dass sich die Einzelschlagenergie mit der Schlagfrequenz ändert. Die Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren sind somit multikollinear. Für Untersuchungen und Optimierungen lassen sich diese daher nur als abhängige Faktorkombination einstellen.

Die Korrelation von der Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie ist in Abbildung 2.20 blau eingezeichnet. Wird die Vorschubkraft in Untersuchungen eingestellt (grün), so ändern sich auch systemspezifisch die Schlagfrequenz und die Einzelschlagenergie (blau). Durch eine Drehzahldrückung des Bohrhammers können Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie durch eine steigende Vorschubkraft absinken. Beim Hammerbohren können daher nur abhängige Faktorkombinationen von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie untersucht werden. Hierdurch können Effekttanteile der Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission nicht eindeutig einem Faktor zugeordnet werden. Da in Untersuchungen beim Hammerbohren die Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie bisher nur abhängig untersucht werden konnten, kann gesagt werden, dass Wissen fehlt, wie diese Faktoren unabhängig voneinander eingestellt werden können.

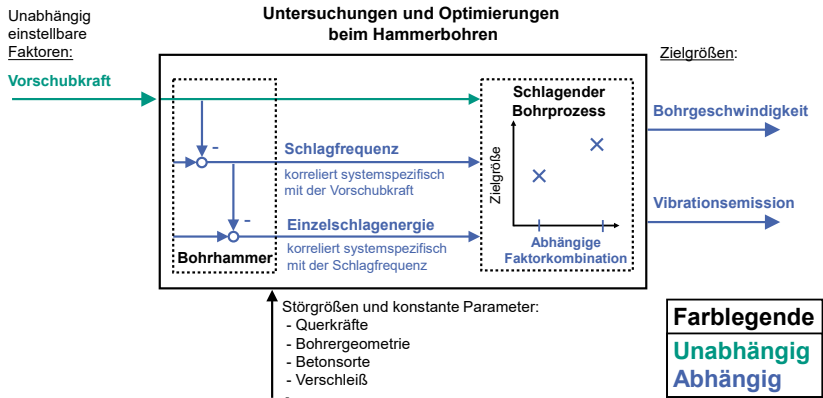


Abbildung 2.20: Blockschaubild für Untersuchungen beim Hammerbohren. Die Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie sind multikollinear. Für Untersuchungen und Optimierungen lassen sich diese daher nur als abhängige Faktorkombinationen einstellen.

Die Korrelation von Vorschubkraft und Schlagfrequenz ist auf eine systemspezifische Drehzahldrückung des Motors zurückzuführen. Verschiedene Motoransteuerungen, wie auch bei verschiedenen Bohrhämmern in den unterschiedlichen Studien zum Hammerbohren verwendet, haben daher einen Einfluss auf diese Korrelation. Das elektropneumatische Schlagwerk hat ein zyklisches Lastmoment. Aus dem Stand der Forschung sind zyklische Motoransteuerungen bekannt, um Korrelationen aufzulösen. Die Auflösung der Multikollinearität von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie über Motoransteuerungen kann daher ein passender Ansatz sein.

3 Motivation und Zielsetzung

Arbeitsproduktivität und Ergonomie beim Hammerbohren werden über die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission des Bohrhammers bewertet. Die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission sind daher wichtige Zielgrößen für Untersuchungen und Optimierungen beim Hammerbohren. Es konnte aufgezeigt werden, dass diese Zielgrößen besonders über die Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beeinflusst werden.

Wurden bisher im Stand der Forschung Effekte der Vorschubkraft beim Hammerbohren untersucht, so konnte der Effekt auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission nur vermischt mit Effektanteilen einer korrelierenden Schlagfrequenz bestimmt werden. Mit steigender Vorschubkraft wird die Motordrehzahl durch ein steigendes Lastmoment am Bohrer reduziert. Dies reduziert systemspezifisch die Schlagfrequenz.

Es ist daher unbekannt, welche Effektanteile von Vorschubkraft und Schlagfrequenz auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission dem jeweiligen Faktor zuzuordnen sind, da die Faktoren Vorschubkraft und Schlagfrequenz noch nie getrennt untersucht wurden. Die Schlagfrequenz korreliert zusätzlich mit der Einzelschlagenergie des elektropneumatischen Schlagwerks. Diese Faktoren können durch Motoransteuerungen nur voneinander abhängig eingestellt werden.

Das Problem bei Untersuchungen beim Hammerbohren ist somit, dass die Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie stark korrelieren. Die Faktoren sind multikollinear. Diese Multikollinearität bedeutet zum einen, dass Faktoren nur voneinander abhängig eingestellt werden können. Zum anderen können die Effektanteile der Faktoren nicht eindeutig den jeweiligen Faktoren zugeordnet werden. Dies verhindert, dass optimale Parametereinstellungen bei verschiedenen Anwendungen verwendet werden können. Die Multikollinearität der Faktoren erschwert somit Optimierungen beim Hammerbohren. Für verschiedene Anwendungen müssen derzeit Kompromisse zwischen den Faktoren eingegangen oder verschiedene Bohrhämmer mit unterschiedlichen Faktorkombinationen verwendet werden.

Diese Arbeit hat daher das **Ziel**, Korrelationen der Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken aufzulösen. Diese Arbeit fokussierte hierfür den Ansatz über Motoransteuerungen, da diese nur durch Änderungen von

Steuerparametern gezielt variiert werden können. Um dies experimentell nachweisen zu können, beinhaltet dieses Ziel die Entwicklung der Motoransteuerungen sowie den Aufbau einer passenden Untersuchungsumgebung.

4 Forschungsdesign

Dieses Kapitel beschreibt das verwendete Forschungsdesign. Es dient der Erreichung des Forschungsziels, Korrelationen der Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken allein durch Motoransteuerungen aufzulösen. Aus diesem Ziel wird die folgende Hauptforschungsfrage abgeleitet:

Hauptforschungsfrage:

Lässt sich die Korrelation von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken allein durch Motoransteuerungen auflösen?

Um diese übergeordnete Hauptforschungsfrage beantworten zu können, werden zwei Forschungsfragen abgeleitet. Zu jeder der zwei Forschungsfragen werden dazugehörige Unterforschungsfragen abgeleitet. Diese lauten wie folgt:

Forschungsfrage 1: Lässt sich mit einer konstanten Motoransteuerung die Korrelation zwischen der Schlagfrequenz und der Vorschubkraft beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken auflösen?

Unterforschungsfrage 1.1: Welche Effekte haben unabhängig eingestellte Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Bohrgeschwindigkeit?

Unterforschungsfrage 1.2: Welche Effekte haben unabhängig eingestellte Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Vibrationsemission?

Forschungsfrage 2: Lässt sich mit einer konstanten, sowie mit der Schlagfrequenz zyklischen, Motoransteuerung die Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie in elektropneumatischen Schlagwerken auflösen?

Unterforschungsfrage 2.1: Hat die mit der Schlagfrequenz zyklische Motoransteuerung *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* einen Effekt auf den zyklischen Verlauf der Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen?

Unterforschungsfrage 2.2: Lässt sich mit der zyklischen Motoransteuerung *CIID* die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz einstellen?

Unterforschungsfrage 2.3: Hat eine mit *CIID* von der Schlagfrequenz unabhängig eingestellte Einzelschlagenergie beim Hammerbohren einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission?

Frey et al. (2003) untersuchten in ihrer Studie den Effekt des Umsetzwinkels zur Optimierung der Bohrgeschwindigkeit. Als Untersuchungsumgebung wurde ein Bohrhammer mit getrennt angetriebenem Schlagwerk und Bohrrotation verwendet. Über ein selbstlernendes neuronales Netz wurden die Schlagfrequenz und Bohrrotation angepasst um, damit den Umsetzwinkel zu verändern. Dieses von Frey et al. (2003) verwendete Konzept eines Bohrhammers mit getrenntem Antriebsstrang, wie in Kapitel 2.4 vorgestellt, wird in dieser Arbeit als Untersuchungsumgebung genutzt, um Motoransteuerungen zu untersuchen, welche Korrelationen beim Hammerbohren auflösen können.

Die Aufteilung der zwei Forschungsfragen zum Erreichen des Forschungsziels, Korrelationen von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken allein durch Motoransteuerungen aufzulösen, ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Dieses Vorgehen beinhaltet jeweils die aufzulösende Korrelation, das Konzept der Motoransteuerung, die notwendigen Untersuchungen und hierbei adressierte Ergebnisse.

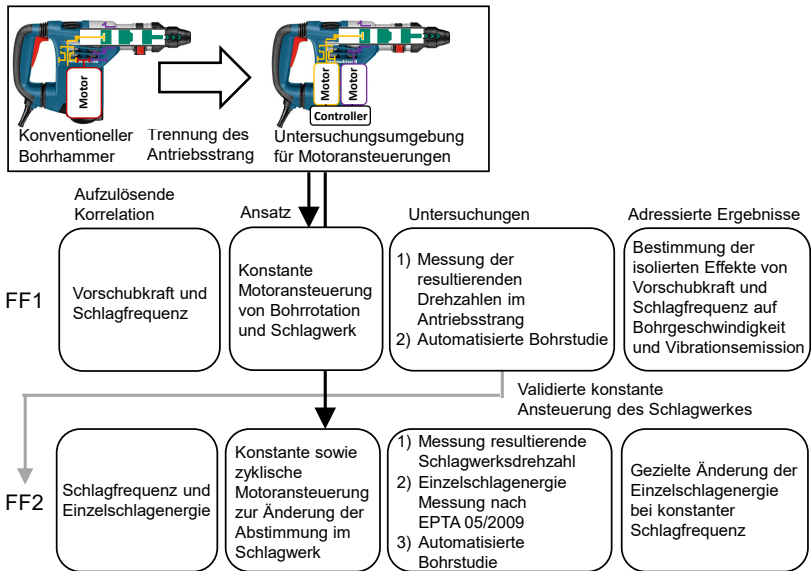


Abbildung 4.1: Forschungsdesign mit zwei Forschungsfragen zum Auflösen der Korrelationen von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren durch Motoransteuerungen.

Forschungsfrage 1 adressiert die Auflösung der Korrelation von Vorschubkraft und Schlagfrequenz. Es wird untersucht, ob die Korrelation von Vorschubkraft und Schlagfrequenz mit einer konstanten Motoransteuerung aufgelöst werden kann. In Anlehnung an das Konzept von Frey et al. (2003) wird hierzu ein Bohrhammer mit getrenntem Antriebsstrang als Untersuchungsumgebung entwickelt, mit welchem die Schlagfrequenz unabhängig von der Vorschubkraft eingestellt werden kann. Mit diesem Bohrhammer als Untersuchungsumgebung ist es möglich Motoransteuerungen gezielt zu untersuchen. In einer automatisierten Bohrstudie werden Vorschubkraft und Schlagfrequenz unabhängig voneinander eingestellt. Bisher immer kombiniert auftretende Effekte von Vorschubkraft und Schlagfrequenz werden in dieser Studie erstmalig getrennt bestimmt. Dies ermöglicht es, die beiden dazugehörigen Unterforschungsfragen zu beantworten. Die **Unterforschungsfrage 1.1** untersucht, welche Effekte die unabhängig eingestellte Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Bohrgeschwindigkeit haben. **Unterforschungsfrage 1.2** untersucht die Effekte von unabhängig eingestellter Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Vibrationsemission. Ein Vergleich der

jeweiligen Effektanteile ermöglicht es, durchgeführte Bohrhammerstudien aus dem Stand der Forschung neu zu bewerten. Über die Messung der resultierenden Motordrehzahlen wird untersucht, ob der Bohrhammer in der Lage ist, während der dynamischen Belastung beim Hammerbohren die Schlagfrequenz unabhängig von der Vorschubkraft, und damit ohne Korrelation, einzustellen. Dies ist eine notwendige Voraussetzung zur Untersuchung der **Forschungsfrage 2**.

Die **Forschungsfrage 2** adressiert die Auflösung der Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie. Es wird untersucht, ob eine konstante, sowie mit der Schlagfrequenz zyklische, Motoransteuerung die Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie auflösen kann. Auch hierzu wird der Bohrhammer mit getrenntem Antriebsstrang als Untersuchungs Umgebung genutzt. Eine zyklische Ansteuerung für elektropneumatische Bohrhammerschlagwerke wird unter Berücksichtigung der Ansätze von Paulos und Yim (2013) und Lee et al. (2013) abgeleitet. Diese zyklische Ansteuerung soll die Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie auflösen. Die Ansätze von und werden als Referenz genommen, da diese einerseits in ihren Studien Motoren zyklisch ansteuern. Andererseits findet man, wie auch in elektropneumatischen Bohrhammerschlagwerken, in Schlagschraubern und auch in den Rotoren der Studie von Paulos und Yim (2013), eine nicht starre Kopplung im Leistungsfluss.

In der **Unterforschungsfrage 2.1** wird untersucht, ob die zyklische Ansteuerung einen Effekt auf den zyklischen Verlauf der Motordrehzahl hat. Dies wird für verschiedene Schlagfrequenzen experimentell untersucht. Zur Beantwortung der **Unterforschungsfrage 2.2** wird das Messverfahren EPTA 05/2009 verwendet (Nalbach, 2009). Hier wird untersucht, ob durch die zyklische Ansteuerung des Motors die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz eingestellt werden kann.

In **Unterforschungsfrage 2.3** wird untersucht, ob diese von der Schlagfrequenz unabhängig eingestellte Einzelschlagenergie beim Hammerbohren einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission hat. Hierzu wird die Schlagfrequenz konstant gehalten und die Einzelschlagenergie durch die zyklische Motoransteuerung variiert. Dies wird durch eine automatisierte Bohrstudie an einem automatisierten Bohrprüfstand untersucht. Effekte werden, analog zu der **Forschungsfrage 1**, bezüglich der Bohrgeschwindigkeit und der Vibrationsemission ausgewertet. Ergebnis der **Forschungsfrage 2** soll die Auflösung der Korrelation der Einzelschlagenergie mit der Schlagfrequenz durch die neue zyklische sowie konstante Motoransteuerung *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* sein.

Die Auswertung der beiden Studien ermöglicht die Beantwortung der beiden Forschungsfragen, und damit auch der **Hauptforschungsfrage**. Dies erreicht das Ziel dieser Arbeit, die Auflösung der Korrelationen zwischen Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken durch Motoransteuerungen.

5 Auflösung der Korrelation von Schlagfrequenz und Vorschubkraft

In diesem Kapitel wird die **Forschungsfrage 1** untersucht und beantwortet:

Forschungsfrage 1: Lässt sich mit einer konstanten Motoransteuerung die Korrelation zwischen der Schlagfrequenz und der Vorschubkraft beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken auflösen?

Zu dieser Forschungsfrage gehören die folgenden Unterforschungsfragen:

Unterforschungsfrage 1.1: Welche Effekte haben unabhängig eingestellte Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Bohrgeschwindigkeit?

Unterforschungsfrage 1.2: Welche Effekte haben unabhängig eingestellte Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Vibrationsemission?

Die nachfolgenden Inhalte dieses Kapitels zur Beantwortung der **Forschungsfrage 1** wurden vom Autor der vorliegenden Arbeit in

S. Zimprich, F. Matter, J. Reiser, J.H. Robens, S. Matthiesen, The effect of feed force on vibration and productivity in hammer drilling: A machine-independent analysis excluding the effect of motor speed reduction, International Journal of Industrial Ergonomics 98 (2023) 103524. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103524>.

veröffentlicht. Die Methode, Ergebnisse und Diskussion werden in großen Teilen unverändert wiedergegeben. Abbildungen und Abschnitte des nachfolgenden Textes basieren somit auf der genannten Veröffentlichung und wurden in übersetzter Form übernommen. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wird im Gegensatz zu den Abbildungen darauf verzichtet, die Texte gesondert zu kennzeichnen.

Um die Forschungsfragen beantworten zu können, wird ein Bohrhämmer entwickelt, mit welchem Schlagfrequenz; Bohrdrehzahl und Vorschubkraft beim Hammerbohren unabhängig eingestellt werden können. Die mit der Vorschubkraft korrelierte Reduktion der Schlagfrequenz wird in dieser Studie durch die

gemeinsame Motoransteuerung von Schlagwerk und Bohrrotation abgebildet. Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl müssen daher auch bei Änderungen der Vorschubkraft konstant gehalten werden. In einer automatisierten Bohrstudie wird daher durch die Messung der resultierenden Motordrehzahlen von Bohr- und Schlagantrieb untersucht, ob Schlagfrequenz und Vorschubkraft unabhängig und damit ohne Korrelation einstellbar sind. Diese Validierung ist notwendig, da die alleinige Ansteuerung der Drehzahlen während der dynamischen Belastung beim Hammerbohren nicht sicherstellt, dass die Drehzahlen auch erreicht werden. Die unabhängig eingestellte Schlagfrequenz und Vorschubkraft werden bezüglich der Bohrgeschwindigkeit und der Vibrationsemission ausgewertet. Die Auswertung der isolierten Effekte von Vorschubkraft und Schlagfrequenz auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission ist in dieser Studie erstmalig möglich. Der Nachweis signifikanter Effekte zeigt auf, dass die Multikollinearität aufgelöst werden konnte.

5.1 Methode

Im ersten Unterkapitel wird das Versuchsdesign zur Bestimmung der Effekte der unabhängig eingestellten Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission vorgestellt. Da die Faktoren multikollinear sind, kann eine solche Studie mit einem konventionellen Bohrhammer nicht durchgeführt werden. Ein Bohrhammer als Untersuchungsumgebung wurde daher modifiziert. Der mechanisch verbundene Antrieb des Schlagwerks und der Rotation des Bohrwerkzeugs wurde aufgetrennt und durch zwei separate Motoren angetrieben. Hierdurch ist es möglich, die Schlagfrequenz über eine Motoransteuerung in einem breiten Vorschubkraftbereich konstant zu halten. Die Reduktion der Schlagfrequenz in dieser Studie wird zusammen mit der Reduktion der Bohrdrehzahl untersucht, da dies der Drehzahlrückung eines konventionellen Bohrhammers entspricht. Dieser Bohrhammer wird im zweiten Unterkapitel gezeigt. Der automatisierte Bohrprüfstand für reproduzierbare Bohrversuche wird im dritten Unterkapitel vorgestellt. Die Datenauswertung und die durchgeführten statistischen Analysen werden im vierten Unterkapitel erläutert.

5.1.1 Versuchsdesign

Um den Effekt von Vorschubkraft und Schlagfrequenz auf die Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission zu ermitteln, wurden Vorschubkraft und Schlagfrequenz in sieben Faktorkombinationen variiert. Die Vorschubkraft wurde in drei verschiedenen Stufen variiert. Die Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl wurden mit einem

modifizierten Bohrhammer eingestellt. Für die Studie müssen in einem ersten Schritt die Faktorstufen festgelegt werden.

Um die Faktorstufen der Vorschubkraft festzulegen, muss beachtet werden, dass nach der DIN EN ISO 28927-10:2011 eine minimale Vorschubkraft für einen stabilen Betrieb des Bohrhammers notwendig ist. Dieser stabile Betrieb ist mit einer Vorschubkraft von 120 N sichergestellt. Daher wurde dieser Wert als erste Faktorstufe gewählt. Als zweite Faktorstufe wurden 200 N festgelegt, da dieser Wert im üblichen Bereich der Vorschubkraft liegt (Uhl et al., 2021; Uhl et al., 2022; Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023). Eine Vorschubkraft von 280 N wurde als dritte Faktorstufe gewählt. Hiermit wurde ein äquidistanter Abstand zwischen den Stufen erreicht. Die Stufe 280 N Vorschubkraft führt zu einer hohen Reibung im Bohrloch. Dies führt bei herkömmlichen Bohrhämmern zu einem starken Abfall der Schlagfrequenz.

Um die drei Faktorstufen der Schlagfrequenz festlegen zu können, muss bekannt sein, wie die Schlagfrequenz mit der Vorschubkraft systemspezifisch im zu untersuchenden System korreliert. Um die Drehzahlrückung in der Studie daher realistisch abbilden zu können, wurde die systemspezifische Korrelation der Vorschubkraft im Originalsystem in einer Vorstudie gemessen. Mit dem Bohrhammer Bosch GBH 4-32 (Modell GBH 4-32 DFR, Robert Bosch Power Tools GmbH, Leinfelden-Echterdingen) und einem vierschneidigen Bohrwerkzeug des Durchmessers 16 mm (Modell DeWalt DT9680 QZ-SDS+FHC 16 mm x 150 mm, DEWALT Deutschland, Idstein, Deutschland) wurden Löcher in Beton der Druckfestigkeitsklasse C50/60 (Betonprüfkörper C50/60, Rau-Betonfertigteile, Ebhausen, Deutschland) gebohrt (DIN EN 206:2021-06). Mit einem triaxialen Beschleunigungssensor (Modell 356A02, PCB Piezotronics, Depew, NY, USA) wurde die Vibration des Bohrhammers gemessen. Hierüber wurde die Schlagfrequenz ausgewertet. Die Einzelschlagenergie des Bohrhammers wurde bei den drei verschiedenen Schlagfrequenzen nach dem Messverfahren EPTA 05/2009 gemessen (Nalbach, 2009). Die zugehörige Schlagleistung des Bohrhammers wurde durch Multiplikation der Schlagfrequenz mit der entsprechenden Einzelschlagenergie berechnet. Die Einzelschlagenergie des Bohrhammers Bosch GBH 4-32 beträgt laut Datenblatt 4,2 J.

Für die drei definierten Faktorstufen der Vorschubkraft sind die zugehörigen Schlagfrequenzen, Bohrdrehzahlen, Einzelschlagenergien und Schlagleistungen in Tabelle 5.1 aufgeführt. Mit der Schlagfrequenz reduziert sich über die Drehzahlrückung des Motors gleichzeitig die Drehgeschwindigkeit des Bohrwerkzeuges, da diese über das Getriebe mechanisch gekoppelt sind und eine feste Übersetzung haben. Die Reduktion der Bohrdrehzahl wurde anhand der

Schlagfrequenz über den festen Wert der Getriebeübersetzung berechnet. Die **Reduktion der Schlagfrequenz** in dieser Studie wird daher immer **zusammen mit der Reduktion der Bohrdrehzahl** durch die Vorgabe von **zwei Motordrehzahlen** untersucht. Dies **bildet das Verhalten konventioneller Bohrhämmer ab**, sodass die in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse für diese genutzt werden können. Die Schlagfrequenz und die Bohrdrehzahl werden in dieser Studie gemeinsam variiert. Hierdurch wird der Umsetzwinkel konstant gehalten.

Tabelle 5.1: Systemspezifische Korrelation zwischen Vorschubkraft und Schlagfrequenz für den Bohrhämmer Bosch GBH 4-32 (Model GBH 4-32 DFR, Robert Bosch Power Tools GmbH, Leinfelden-Echterdingen) mit einem vierschneidigen Bohrer beim Bohren in C50/60 für drei ausgewählte Faktorstufen der Vorschubkraft.

Vorschubkraft	Schlagfrequenz	Bohrdrehzahl	Einzelschlagenergie nach EPTA 05/2009	Schlagleistung
120 N	57,2 Hz	620,0 1/min	4,43 J	253,4 W
200 N	56,1 Hz	608,0 1/min	4,19 J	235,1 W
280 N	55,0 Hz	596,4 1/min	4,05 J	222,8 W

Basierend auf der Vorstudie und den daraus resultierenden Betriebspunkten des Bohrhammers wurde der Versuchsplan abgeleitet, welcher in Abbildung 5.1 dargestellt ist. Um den unabhängigen Effekt der Vorschubkraft zu ermitteln, wurde die Vorschubkraft variiert, während die Motordrehzahlen, und damit Schlagfrequenz und Bohrdrehzahlen, konstant gehalten wurden. Dies geschah bei der höchsten und der niedrigsten zugehörigen Stufe der Motordrehzahlen. Daraus ergaben sich sechs untersuchte Faktorkombinationen. Zusätzlich wurde das mittlere Vorschubkraftniveau mit der ursprünglich zugehörenden Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl untersucht. Dies ergibt sieben zu untersuchende Faktorkombinationen in dieser Studie. Dieser Versuchsplan ermöglicht es, den eigentlich kombinierten Effekt der Vorschubkraft aufzutrennen. In einen unabhängigen Effekt der Vorschubkraft und einen systemspezifischen Effekt durch die Drehzahldrückung, welche sich in einer Reduktion der Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl widerspiegelt.

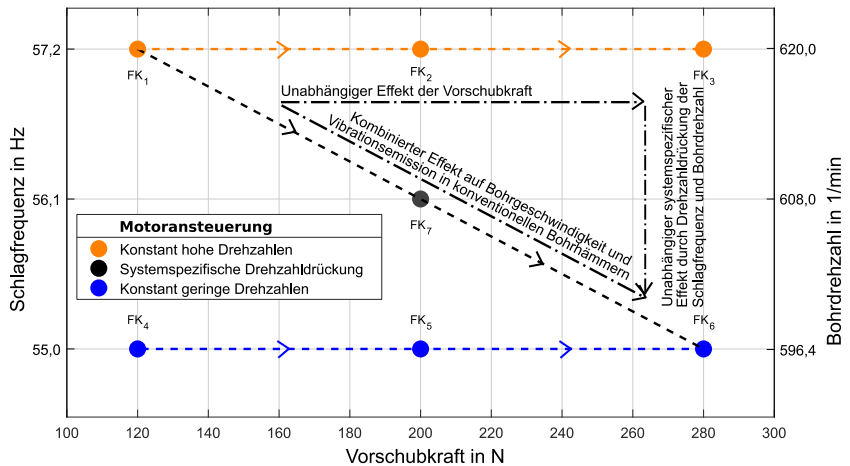


Abbildung 5.1: Versuchsplan zur Untersuchung der unabhängigen Effekte von Vorschubkraft und der systemspezifischen Effekte aus der Drehzahl drückung. Vorschubkraft und Motordrehzahlen, dargestellt in Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl, wurden in sieben Faktorkombinationen variiert (Zimprich, Matter, Reiser, Robens & Matthiesen, 2023).

Die obere orangefarbene Linie mit den Faktorkombinationen FK₁, FK₂ und FK₃ zeigt die Motoransteuerung einer konstanten hohen Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl bei variierender Vorschubkraft. Die untere blaue Linie mit FK₄, FK₅ und FK₆ spiegelt eine Motoransteuerung für eine konstante niedrige Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl bei variierender Vorschubkraft wider. Mit den Faktorkombinationen einer Linie kann der Effekt der Vorschubkraft bei konstanter Motordrehzahl bewertet werden. Durch den Vergleich der Ergebnisse, die bei gleicher Vorschubkraft, aber unterschiedlichen Motordrehzahlen erzielt wurden (obere orangefarbene Linie gegen untere blaue Linie), kann der systemspezifische Effekt der Drehzahl drückung ermittelt werden. Dieses Versuchsdesign trennt somit den Effekt der Vorschubkraft von den Effekten der Schlagfrequenz sowie von den Effekten der Drehzahl drückung des Bohrwerkzeugs beim Hammerbohren. Die mittlere schwarze Linie mit FK₁, FK₇ und FK₆ stellt das Verhalten eines konventionellen Bohrhammers dar. Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl sinken über den Verlauf mit steigender Vorschubkraft.

Um statistisch belastbare Ergebnisse zu erhalten, wurde jeder Bohrversuch der sieben Faktorkombinationen in dieser Studie 25 Mal wiederholt. Dies ergibt 175

Bohrungen. Jedes Bohrloch hatte eine Bohrtiefe von 115 mm, was eine Gesamtbohrtiefe von 20.125 mm ergab. Das Bohrwerkzeug wurde nach 35 gebohrten Löchern gewechselt, da die kumulative Bohrtiefe die Vibrationsemission und die Bohrgeschwindigkeit aufgrund von zunehmendem Verschleiß des Bohrwerkzeuges beeinflusst (Antonucci et al., 2017; Botti et al., 2020; Rempel, Barr et al., 2017; Rempel, Antonucci, Barr & Martin, 2017). Die Anzahl an 35 gebohrten Löchern pro Bohrer orientierte sich an den 48 gebohrten Löchern pro Bohrer aus der Studie von Uhl, Robens, Gauch und Germann et al. (2023). Die Anzahl 35 wurde gewählt, da dies ein Teiler der Versuchsanzahl von 175 und ein Vielfaches der sieben Faktorkombinationen ist. So konnte die Reihenfolge der sieben Faktorkombinationen im Versuchsplan durch Blockbildung jeweils innerhalb eines verwendeten Bohrers randomisiert werden. Die Position der Bohrlöcher über den Betonblock wurde ebenfalls randomisiert verteilt, um potentielle Trendeffekte über den Versuchsplan zu vermischen.

5.1.2 Modifizierter Bohrhammer DualDrive als Untersuchungsumgebung

Konventionelle Bohrhämmer verwenden einen einzelnen Motor, wodurch es eine mechanische Kopplung im Getriebe von Dreh- und Schlagwerk gibt. Mit zunehmender Vorschubkraft steigt die Bohrlochreibung. Dies führt bei konventionellen Bohrhämmern zu einer Drehzahlrückung. Durch die Kopplung über das Getriebe sinkt daher neben der Bohrdrehzahl auch die Schlagfrequenz. Ein modifizierter Bohrhammer ist daher erforderlich, um Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl über einen breiten Vorschubkraftbereich unabhängig einstellen zu können. Um diese systemspezifische Kopplung zwischen Vorschubkraft und Motordrehzahl sicher zu eliminieren, wurde der Leistungsfluss von Dreh- und Schlagwerk getrennt. Hierdurch können durch Motoransteuerungen beide Antriebsstränge gezielt eingestellt werden (Frey et al., 2003). Der Bohrhammer Bosch GBH 4-32 wurde hierfür als Untersuchungsumgebung modifiziert. Dieser Bohrhammer wurde so modifiziert, dass Schlagwerk und Bohrrotation mechanisch entkoppelt wurden. Diese werden nun von zwei Motoren getrennt angesteuert. Da nur der Antriebsstrang modifiziert wurde, blieben das Schlagwerk, der Griff und das obere Gehäuse im Originalzustand. Da der modifizierte Bohrhammer über zwei Motoren verfügt, wird er in dieser Arbeit als *DualDrive*-Bohrhammer bezeichnet. Der ursprüngliche Bohrhammer und der Bohrhammer *DualDrive* mit getrennten Antriebsstrang ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

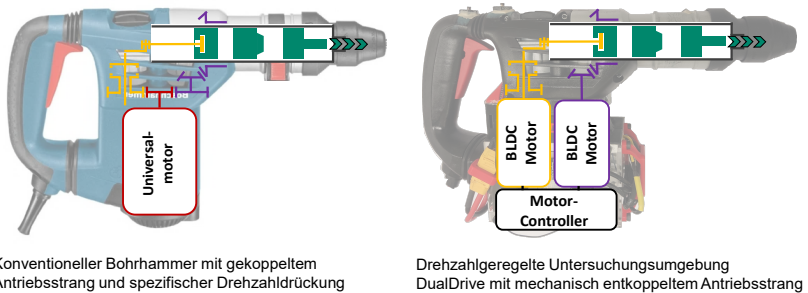


Abbildung 5.2: Der konventionelle Bohrhämmer und der modifizierte Bohrhämmer *DualDrive* mit drehzahlgeregelten Motoren als Untersuchungsumgebung. Der Antriebsstrang wurde aufgetrennt, um die Getriebekopplung von Schlagfrequenz und Bohrrotation aufzuheben (Zimprich et al., 2023).

Um konstante Motordrehzahlen auch bei hohen Vorschubkräften zu erreichen, muss eine ausreichend große Leistungsreserve vorhanden sein. Der ursprüngliche Bohrhämmer Bosch GBH 4-32 wird mit einer elektrischen Nenneingangsleistung von 900 W vom Hersteller angegeben. Der neue drehzahlgeregelte Motor für die Bohrrotation hatte eine elektrische Nennleistung von 2000 W. Die Nennleistung des drehzahlgeregelten Schlagmotors betrug 1820 W. Es wurden zwei Motor-Controller des Typs "VESC 6 MKV by Trampa" genutzt (VESC 6 MkV, Trampa Boards Ltd, Nottingham, Großbritannien). Die großen Leistungsreserven erleichterten die Motorsteuerung und ermöglichen es, konstante Motordrehzahlen zu erreichen. Der sich ändernde Ladezustand eines Akkus hätte Trendeffekte, und damit eine erhöhte und systematische Versuchsstreuung, zur Folge. Durch ein Netzteil (Modell EA-PSI 9080-120 2U, EPS Stromversorgung GmbH - Electronic Power Supplies, Augsburg, Deutschland) wurde eine konstante Versorgungsspannung bereitgestellt. Ein 32-Bit Teensy 4.1-Microcontroller Board diente zur Ansteuerung der Motor-Controller (Teensy® 4.1 Development Board, PJRC.com LLC., Sherwood, OR, USA). Das Gewicht eines Bohrhammers beeinflusst die Vibrationsemission (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2023). Daher wurde darauf geachtet, dass der Bohrhämmer *DualDrive* ein Gewicht im Bereich des originalen Bohrhammers erreicht (Original: 4,7 kg, *DualDrive*: 5,4 kg). Das Gewicht des *DualDrive* Bohrhammers liegt somit zwar etwas höher, ist aber für Bohrhämmer dieser Leistungsklasse weiterhin üblich.

5.1.3 Prüfstand und Versuchsaufbau

Um Bohrungen mit kontrollierter und einstellbarer Vorschubkraft zu bohren, wurde ein automatisierter Bohrprüfstand verwendet. Der vollständige Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.3 dargestellt. In dieser Studie wurde ein sechssachsiger Roboter für automatisiertes Hammerbohren verwendet (Modell KR 500 R2830 MT, KUKA, Augsburg, Deutschland) (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2023). Die Steuerung und Datenerfassung erfolgte mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 12,5 kHz über ein ADwin-Pro II-System (ADwin-Pro II, Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH, Lorsch, Deutschland). Für die Anbindung des Bohrhammers an den Roboter wurde ein translatorisches Hand-Arm-Modell für automatisierte Bohrversuche verwendet. Dieses Hand-Arm-Modell wurde am IPEK entwickelt und basiert auf den Steifigkeits-, Dämpfungs- und Masseparametern nach Jahn und Hesse (1986). Das Hand-Arm-Modell mit Spiralfedern und Gummidämpfern spannt den Bohrhammer nachgiebig am Roboter ein. Die Konfiguration der Parameter Steifigkeit, Dämpfung und Masse bilden hierbei das menschliche Hand-Arm-System für Hammerbohren wirkungsäquivalent bezüglich der Schwingungseigenschaften im Betriebsbereich eines Bohrhammers ab. Dies ermöglicht es, die Vibrationsemission mit dem a_{hv} -Wert im automatisierten Bohrprüfstand zu bewerten (Jahn & Hesse, 1986). Es wurde ein Betonblock der Druckfestigkeitsklasse C50/60 mit den Abmessungen 800x800x300 mm³ in dieser Bohrstudie verwendet (Betonprüfkörper C50/60, Rau-Betonfertigteile, Ebhausen, Deutschland) (DIN EN 206:2021-06). Die Betonprobe wurde vor dem Bohren mindestens 28 Tage lang gelagert, um der Norm zur Messung der Vibrationsemission zu entsprechen (DIN EN ISO 28927-10:2011).

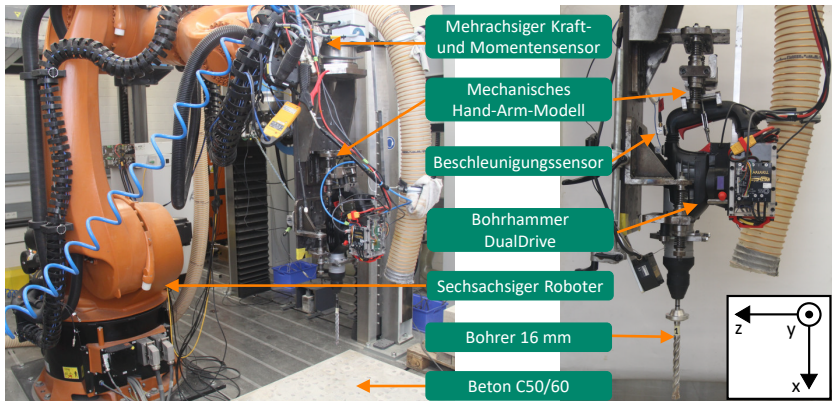


Abbildung 5.3: Roboter mit sechs Achsen und einstellbarer Vorschubkraft für automatisierte Hammerbohrversuche. Der Bohrerhammer wurde über ein Hand-Arm-Modell eingespannt, um das passive Schwingungsverhalten des Menschen nachzubilden. Der Beschleunigungssensor zur Messung der Vibrationsemission wurde gemäß der DIN EN ISO 28927-10:2011 angebracht (Zimprich et al., 2023).

Die Vorschubkraft wurde mit dem mehrachsigen Kraft- und Drehmomentsensor (Modell NET FT Omega 160-IP65, ATI, Apex, NC, USA) gemessen. Querkräfte wurden auf 0 N geregelt (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2023). Die Vibrationsemission wurde mit einem triaxialen Beschleunigungssensor (Modell 356A02, PCB Piezotronics, Depew, NY, USA) erfasst. Dieser wurde am Hauptgriff angebracht, wie in der DIN EN ISO 28927-10:2011 für Vibrationsmessungen beim Hammerbohren beschrieben. Die Bohrtiefe wurde kontinuierlich durch die Position des Tool Center Points des Roboters in Bohrrichtung gemessen. Die Gehäusetemperatur des Bohrerhammers wurde mit einem Temperatursensor (Modell TJC100-ICSSM050U-150, OMEGA Engineering GmbH, Deckenpfronn, Deutschland) überwacht. Vor dem ersten Versuch wurde der Bohrerhammer mit einer Warmlaufphase von etwa 10 Min. auf Temperatur gebracht (DIN EN ISO 28927-10:2011). Die Stromaufnahme des Bohrerhammers wurde mit einer Strommesszange gemessen (Modell i310s, Fluke Corporation, Everett (Washington), USA). Zusätzlich wurden die jeweiligen Motorströme und Motordrehzahlen der zwei Motoren mit den dazugehörigen Motor-Controllern bei einer Aufzeichnungsfrequenz von 200 Hz aufgezeichnet. Der Strombedarf wurde daher mit dem ADwin-Pro II-System und den Motor-Controllern erfasst. Durch eine Kreuzkorrelation der zwei

Stromsignale konnten die Signale der Messsysteme somit zeitlich synchronisiert werden.

Die DIN EN ISO 28927-10:2011 empfiehlt für Vibrationsmessungen mit dem originalen Bohrerhammer Bosch GBH 4-32 einen Durchmesser des Bohrwerkzeugs von 16 mm (DIN EN ISO 28927-10:2011). Wie in der Vorstudie wurde daher ein vierschneidiges Bohrwerkzeug des Durchmessers 16 mm (Modell DeWalt DT9680 QZ-SDS+FHC 16 mm x 150 mm, DEWALT Deutschland, Idstein, Deutschland) gewählt. Dieser Bohrer hat einen Durchmesser von 16 mm und eine maximal mögliche Bohrtiefe von 150 mm.

5.1.4 Datenauswertung der Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission

Für die Auswertung der Bohrgeschwindigkeit wird der Bohrweg s durch die Bohrzeit t geteilt. Der Bohrweg s wird über die Bewegung der Bohrspitze ausgewertet. Die Position der Bohrspitze wird indirekt über die Tool Center Point Position des Roboters bestimmt. Hierfür muss ein konstanter Abstand zwischen der Spitze des Bohrers und dem Tool Center Point gegeben sein. Zum Beginn jeder Bohrung ändert sich dieser Abstand jedoch. Der Grund hierfür ist, dass es eine kurze Zeit dauert, bis der Sollwert der Vorschubkraft erreicht ist. Diese Änderung der Vorschubkraft komprimiert die Federn im Hand-Arm-Modell, wodurch sich zum Beginn der Bohrung der Abstand zwischen der Bohrspitze und dem Tool Center Point verringert. Nach einer kurzen Zeit wird ein konstantes Vorschubkraftniveau, und damit ein konstanter Abstand zwischen Bohrspitze und Tool Center Point, erreicht.

Der Sollwert der Vorschubkraft wurde ab einer Bohrtiefe von 25 mm erreicht. Die Bohrtiefe zwischen 25 mm und 110 mm wurde daher zur Auswertung der Bohrgeschwindigkeit verwendet. Die ausgewertete kumulierte Bohrtiefe belief sich somit auf 14.875 mm. Nach Formel 5.1 wurde die Bohrgeschwindigkeit über die Rate of Penetration (ROP) berechnet. Die ROP wurde berechnet, indem die Bohrtiefe s zwischen 25 mm und 110 mm durch die hierfür benötigte Zeit t geteilt wurde (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023):

$$ROP = \frac{110 \text{ mm} - 25 \text{ mm}}{t(s = 110 \text{ mm}) - t(s = 25 \text{ mm})} \quad 5.1$$

Zur Bewertung der Vibrationsemission wurde der a_{hv} -Wert aus den drei Schwingungssignalen des triaxialen Beschleunigungssensors gemäß DIN EN ISO

28927-10:2011 und DIN EN ISO 5349-1:2001 berechnet. Zusätzlich wurden die mittlere Schlagfrequenz und die mittlere Bohrdrehzahl über die gemessenen Motordrehzahlen der zwei Motor-Controller berechnet. Hierüber wurde überprüft, ob diese Werte in der Studie von der Vorschubkraft unabhängig eingestellt werden konnten. Die mittlere Vorschubkraft, der a_{hv} -Wert, die mittlere Schlagfrequenz und die mittlere Bohrdrehzahl wurden für die Bohrtiefe zwischen 25 mm und 110 mm ausgewertet.

Für die Berechnung der ROP und des a_{hv} -Wertes wurde Matlab verwendet (Matlab R2022b, The MathWorks, Natick, MA, USA). Zur statistischen Auswertung wurde die Software SPSS genutzt (IBM SPSS Statistics 25, IBM, Armonk, NY, USA). Der Levene-Test auf getrimmte Mittelwerte diente zur Überprüfung der Ergebnisse auf Varianzinhomogenität. Zur Bewertung des Effektes der Vorschubkraft und des systemspezifischen Effektes aufgrund der Drehzahldrückung wurde die mehrfaktorielle Varianzanalyse auf Grundlage der Faktorkombinationen eins bis sechs durchgeführt. Die mehrfaktorielle Varianzanalyse wurde für die ROP- und den a_{hv} -Wert durchgeführt. Nach Cohen wurden die Effektgrößen f aus dem partiellen Eta-Quadrat nach Formel 5.2 berechnet (Cohen, 2013). Über die Effektgröße f können die getrennten Effekte der Vorschubkraft und Drehzahldrückung verglichen werden (Cohen, 2013).

$$f = \sqrt{\frac{\eta^2}{1 + \eta^2}} \quad 5.2$$

Die mehrfaktorielle Varianzanalyse kann nur anzeigen, dass es einen Effekt innerhalb der Faktorstufen gibt, nicht aber zwischen welchen Faktorstufen dieser Effekt besteht. Die Vorschubkraft wurde in drei Stufen variiert. Daher wurde die Bonferroni-Korrektur als Post-hoc-Test verwendet, um den Effekt zwischen den einzelnen Stufen zu untersuchen (Hae-Young Kim, 2014). FK_7 wurde als zentraler Punkt im Versuchsdesign verwendet, um Nichtlinearitäten im Faktorraum zu identifizieren. Dieser Punkt wurde mit der Bonferroni-Korrektur analysiert.

5.2 Ergebnisse

Im ersten Unterkapitel wird geprüft, ob mit dem Bohrhämmer *DualDrive* in dieser Studie die Motordrehzahlen, und damit auch die Schlagfrequenz, unabhängig von der Vorschubkraft durch eine konstante Motoransteuerung eingestellt werden konnten. Der Effekt der Vorschubkraft und der systemspezifische Effekt der

Drehzahlrückung auf die Bohrgeschwindigkeit werden im zweiten Unterkapitel untersucht. Im dritten Unterkapitel werden der Effekt der Vorschubkraft und der systemspezifische Effekt der Drehzahlrückung auf die Vibrationsemission anhand des a_{hv} -Wertes ausgewertet.

5.2.1 Validierung der getrennten Einstellung von Schlagfrequenz und Vorschubkraft

Die Vorschubkraft und Motordrehzahlen wurden in dieser Studie unabhängig voneinander variiert, um den unabhängigen Effekt auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission aufzuzeigen. Es muss daher validiert werden, ob der Bohrerhammer *DualDrive* in der Lage ist, Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl bei unterschiedlichen Vorschubkräften konstant zu halten. Die eingestellte Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl sowie die in der Studie gemessenen Werte sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. Die Vorschubkraft wurde durch die Kraftregelung des Roboterprüfstandes eingestellt. Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl wurden über eine konstante Motoransteuerung mit dem Bohrerhammer *DualDrive* eingestellt. Es sind jeweils die Mittelwerte der dazugehörigen Standardabweichung SD aufgeführt.

Tabelle 5.2: Vergleich der Soll- und Ist-Werte für die Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl

	Vorschubkraft							
	120 N		200 N		280 N		200 N	
Soll-Schlagfrequenz in Hz	55,00	57,20	55,00	57,20	55,00	57,20	56,10	
Soll-Bohrdrehzahl in 1/min	596,40	620,00	596,40	620,00	596,40	620,00	608,00	
Faktorkombination	4	1	5	2	6	3	7	
Anzahl der Versuche	25	25	25	25	25	25	25	
Mittlere Vorschubkraft in N	120,0	120,0	200,0	200,0	280,3	280,7	199,9	
SD Vorschubkraft in N	0,3	0,5	0,4	0,5	0,8	0,5	0,5	
Mittlere Schlagfrequenz in Hz	54,98	57,18	54,97	57,16	57,11	57,11,	56,06	
SD Schlagfrequenz in Hz	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,01	
Mittlere Bohrdrehzahl in 1/min	595,70	619,46	595,45	619,17	594,82	594,82	607,32	
SD Bohrdrehzahl in 1/min	0,10	0,08	0,18	0,17	0,38	0,46	0,01	

Die mittlere Vorschubkraft der FK₃ hatte mit 0,7 N die größte Abweichung vom Sollwert. Die Abweichung der mittleren Schlagfrequenz vom Sollwert war ebenfalls bei FK₃ mit 0,09 Hz am höchsten. Auch bei FK₃ wurde die höchste Abweichung der

Bohrdrehzahl festgestellt. Die Abweichung vom Sollwert betrug 1,69 1/min. FK₃ hatte die höchsten Sollwerte für Vorschubkraft, Bohrdrehzahl und Schlagfrequenz in dieser Studie.

Durch die Variation der Vorschubkraft in der Vorstudie kam es bei dem konventionellen Bohrhammer Bosch GBH 4-32 zu einer systemspezifischen Drehzahldrückung. Durch die Erhöhung der Vorschubkraft von 120 N auf 280 N reduzierte sich die Schlagfrequenz um 2,2 Hz, was analog einer Reduktion der Bohrdrehzahl um 23,6 1/min entspricht. Mit der Änderung der Vorschubkraft von 120 N auf 280 N sank die Schlagfrequenz des Bohrhammers *DualDrive* um 0,07 Hz von 57,18 Hz auf 57,11 Hz. Die Bohrdrehzahl sank um 1,15 1/min von 619,46 1/min auf 618,31 1/min. Die beiden Motoren konnten die Motordrehzahl damit nicht vollständig konstant halten. Die gemessene Drehzahldrückung war jedoch sehr gering, im Vergleich zu der Drehzahldrückung im konventionellen Bohrhammer Bosch GBH 4-32.

5.2.2 Getrennter Effekt von Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Bohrgeschwindigkeit (ROP)

Die Mittelwerte der Bohrgeschwindigkeit (ROP) und deren Standardabweichung sind für die sieben Faktorkombinationen in Abbildung 5.4 dargestellt. Jeder Wert basiert auf 25 gebohrten Löchern. Es ist zu erkennen, dass die ROP mit steigender Vorschubkraft und Motordrehzahlen zunimmt. Die FK₆ hatte die niedrigste ROP (Mittelwert = 3,89 mm/s; SD = 0,27 mm/s), während FK₃ die höchsten ROP aufwies (Mittelwert = 5,27 mm/s; SD = 0,42 mm/s). Bei konstanten Motordrehzahlen und damit konstanter Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl stieg die ROP mit der Vorschubkraft. Bei konstanter Vorschubkraft führten die niedrigeren Motordrehzahlen zu einer niedrigeren ROP.

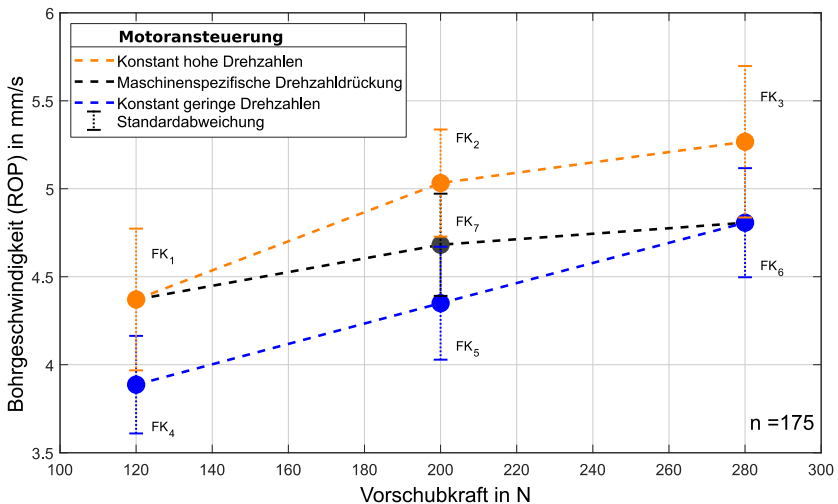


Abbildung 5.4: Mittelwerte und Standardabweichung der Bohrgeschwindigkeit (ROP) für die sieben Faktorkombinationen mit verschiedenen Stufen der Vorschubkraft und Motordrehzahlen. Jede Faktorkombination enthält 25 Versuche bei einer gesamten Versuchsanzahl von 175 (Zimprich et al., 2023).

Einzig für die FK₃ wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test eine Nicht-Normalverteilung festgestellt ($W = 0,915$; $n = 25$; $p = ,039$). Für die anderen Faktorkombinationen kann von einer Normalverteilung ausgegangen werden. Der Levene-Test für getrimmte Mittelwerte ($F(5, 124,541) = 0,968$; $p = ,440$) deutet nicht auf eine Ungleichheit der Varianzen hin. Da hiermit die Voraussetzungen für einen parametrischen Test gegeben waren, wurde die mehrfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Eine Nicht-Normalverteilung ist für diesen Test mit 25 Datenpunkten je Faktorkombination unkritisch (Lantz, 2013). Die Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse sind in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3: Modellterme der mehrfaktoriellen Varianzanalyse für die Vorschubkraft, die Motordrehzahlen und den Interaktionseffekt auf die ROP

Modellterm	df	F	p	η^2
Konstante	1	3200,294	< ,001	,995
Motordrehzahlen	1	11,029	< ,001	,391
Vorschubkraft	2	10,505	< ,001	,550
Motordrehzahlen* Vorschubkraft	2	0,187	,213	,021
Fehlerterme	144			
Total	150			

Basis: n = 150; df = Freiheitsgrade; η^2 = partielles Eta-Quadrat

Sowohl die Vorschubkraft als auch die Motordrehzahlen hatten einen signifikanten Effekt auf die ROP. Der Interaktionseffekt zwischen der Vorschubkraft und Motordrehzahlen war nicht signifikant. Die Effektgrößen wurden aus dem partiellen Eta-Quadrat nach Formel 5.2 berechnet. Die Vorschubkraft hatte eine Effektgröße von $f = 0,66$. Motordrehzahlen hatten einen Effekt von $f = 0,42$. Da beide f-Werte größer sind als 0,4 entspricht dies einem starken Effekt von Vorschubkraft und Motordrehzahlen auf die ROP (Cohen, 2013). Die Bonferroni-Korrektur zeigte einen kontinuierlichen Anstieg der ROP für die einzelnen Faktorstufen der Vorschubkraft an ($p < ,001$ für alle Faktorstufen). Die ROP der FK₇ hatte eine signifikant kleinere ROP als die der FK₂ ($p < ,001$) und eine signifikant höhere ROP als die der FK₅ ($p < ,001$).

5.2.3 Getrennter Effekt von Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Vibrationsemission (a_{hv} -Wert)

Die mittleren a_{hv} -Werte und deren Standardabweichung für die sieben Faktorkombinationen sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Jede Faktorkombination basiert auf 25 gebohrten Löchern, mit Ausnahme der FK₂, welche auf 24 gebohrten Löchern basiert. Beim Bohren eines Bohrlochs kam es trotz einer Regelung der Querkräfte auf 0 N zu einer Verkippung des Bohrhammers. Bei einem solchen Verkappen wird der Bohrer über die Bohrspitze und der Position am Bohrlochrand gegen den Beton abgestützt (Uhl, 2022, S. 59). Die erfassten Querkräfte können hier 0 N betragen, aber dennoch zu einer erhöhten Bohrlochreibung führen. Trotz des höheren Bohrmoments wurde die Bohrdrehzahl konstant gehalten. Diese Verkippung hatte daher keinen Einfluss auf die ROP. Allerdings führte die höhere

Bohrlochreibung zu einer ungewöhnlich hohen Vibrationsemission. Dieser eine Versuch wurde daher in der Auswertung des a_{hv} -Wertes nicht berücksichtigt, wodurch die FK_2 auf 24 Versuchen basiert.

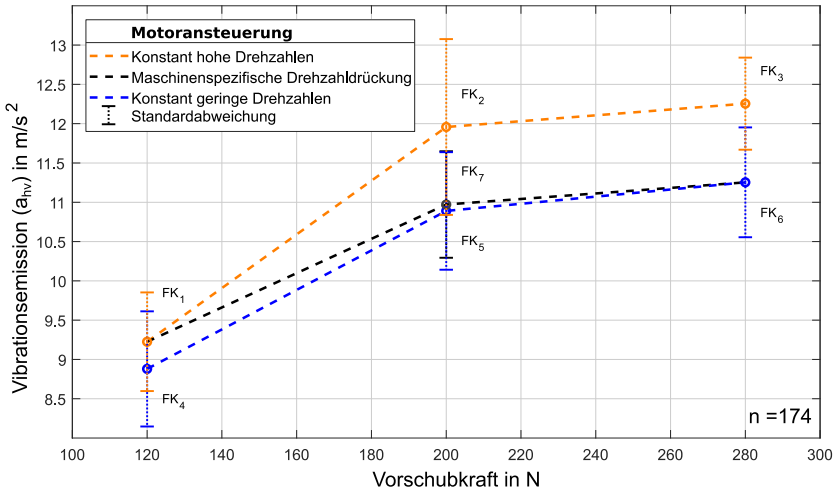


Abbildung 5.5: Mittelwerte und Standardabweichung der Vibrationsemission (a_{hv}) für die sieben Faktorkombinationen mit verschiedenen Stufen der Vorschubkraft und Motordrehzahlen. Diese Abbildung basiert auf 174 Versuchen. Ein Versuch der FK_2 wurde aufgrund von Verkippung in der Auswertung nicht berücksichtigt (Zimprich et al., 2023).

Der Bohrhammer Bosch GBH 4-32, welcher die Basis für die Bohrhammer *DualDrive* darstellt, hat nach Herstellerangaben einen a_{hv} -Wert von 12,0 m/s² mit einem Unsicherheitsfaktor K von 1,5 m/s². Die gemessene a_{hv} -Werte des Bohrhammer *DualDrive* lagen in dieser Studie, je nach Faktorkombination, zwischen 8,88 m/s² und 12,25 m/s². Es ist zu erkennen, dass der a_{hv} -Wert mit der Vorschubkraft und den Motordrehzahlen ansteigt. Der Anstieg im Vorschubkraftbereich von 120 N bis 200 N ist höher als im Bereich von 200 N bis 280 N. Die FK_4 hatte den niedrigsten a_{hv} -Wert (Mittelwert = 8,88 m/s²; SD = 0,73 m/s²), während die FK_3 den höchsten a_{hv} -Wert hatte (Mittelwert = 12,25 m/s²; SD = 0,59 m/s²). Analog zur Auswertung der ROP in Kapitel 5.2.2 wurden die Faktorkombinationen FK_1 bis FK_6 für die mehrfaktorielle Varianzanalyse verwendet. Hierüber wurden die unabhängigen Effekte der Vorschubkraft und Motordrehzahlen auf den a_{hv} -Wert berechnet.

Der Shapiro-Wilk-Test ergab für FK_2 und FK_6 eine Nicht-Normalverteilung (FK_2 : $W = 0,913$; $n = 24$; $p = ,041$ und FK_6 : $W = 0,908$; $n = 25$; $p = ,028$). Für die anderen Faktorkombinationen kann eine Normalverteilung angenommen werden. Der Levene-Test auf getrimmte Mittelwerte ($F(5, 126, 169) = 2,083$; $p = ,072$) zeigte keine signifikanten Varianzunterschiede an. Es ist jedoch anzumerken, dass der p-Wert nahe an der statistischen Signifikanz von $p = ,05$ lag. Da alle Bedingungen für einen parametrischen Test gegeben waren, wurde wieder die mehrfaktorielle Varianzanalyse gewählt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.4 wiedergegeben.

Tabelle 5.4: Modellterme der mehrfaktoriellen Varianzanalyse für die Vorschubkraft, die Motordrehzahlen und den Interaktionseffekt auf den a_{HV} -Wert

Modellterm	df	F	p	η^2
Konstante	1	17141,914	< ,001	,740
Motordrehzahlen	1	22,277	< ,001	,210
Vorschubkraft	2	106,815	< ,001	,718
Motordrehzahlen* Vorschubkraft	2	1,712	,057	,039
Fehlerterme	143			
Total	149			

Basis: $n = 149$; $df =$ Freiheitsgrade; $\eta^2 =$ partielles Eta-Quadrat

Sowohl für die Vorschubkraft als auch für die Motordrehzahlen konnte ein signifikanter Einfluss auf den a_{HV} -Wert nachgewiesen werden. Der Interaktionseffekt von Vorschubkraft und Motordrehzahlen lag mit einem p-Wert von $p = ,057$ knapp an der Grenze zur Signifikanz. Für den a_{HV} -Wert hatte die Vorschubkraft eine Effektgröße von $f = 1,03$. Die Motordrehzahlen hatten eine Effektgröße von 0,21. Dies bedeutet einen starken Effekt der Vorschubkraft und einen schwachen Effekt ($0,1 < f < 0,25$) der Motordrehzahlen auf den a_{HV} -Wert (Cohen, 2013). Die Bonferroni-Korrektur zeigte einen kontinuierlichen Anstieg des a_{HV} -Wertes über die ansteigenden Faktorstufen der Vorschubkraft an ($p < ,001$ für 120 N bis 200 N und $p = ,039$ für 200 N bis 280 N). Der Effekt der Vorschubkraft auf den a_{HV} -Wert war im unteren Vorschubkraftbereich größer als im oberen Vorschubkraftbereich (mittlere Differenz von 2,31 m/s^2 für 120 N bis 200 N und 0,39 m/s^2 für 200 N bis 280 N). Die FK_7 hatte einen signifikant ($p < ,001$) niedrigeren a_{HV} -Wert als FK_2 . Im Vergleich zur FK_5 konnte kein Effekt nachgewiesen werden.

5.3 Diskussion

Im ersten Unterkapitel werden die unabhängige Einstellung von Vorschubkraft und Motordrehzahlen, und damit von Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl, diskutiert. Diese unabhängige Einstellung ist eine notwendige Bedingung zur Auflösung der Korrelation von Schlagfrequenz und Vorschubkraft. Diese unabhängige Einstellung ist notwendig, um die getrennten Effekte von Schlagfrequenz und Vorschubkraft bestimmen zu können. Im zweiten Unterkapitel werden die Effekte der Vorschubkraft und der Motordrehzahlen auf die ROP diskutiert und mit anderen Studien verglichen. Im dritten Unterkapitel werden die Effekte der Vorschubkraft und der Motordrehzahlen auf die Vibrationsemission anhand der gemessenen a_{HV} -Werte diskutiert.

5.3.1 Validierung der getrennten Einstellung von Schlagfrequenz und Vorschubkraft

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Versuchsaufbau bestehend aus dem automatisiertem Bohrprüfstand und dem Bohrhämmer *DualDrive* sich eignet, die Effekte der Vorschubkraft auf den Bohrfortschritt und Vibrationsemission unabhängig von systemspezifischen Effekten der Drehzahldrückung am Motor zu untersuchen. Durch eine konstante Motoransteuerung des Schlagwerkes und der Bohrrotation lässt sich somit die Korrelation zwischen der Schlagfrequenz und Vorschubkraft auflösen. Eine geringe Reduktion der Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl ist zwar in dieser Studie messbar. Im Vergleich zu den eingestellten Faktorstufen oder zu der Drehzahldrückung mit einem konventionellen Bohrhämmer sind diese aber nur sehr gering. Der geringe, aber messbare Abfall von Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl könnte durch eine Optimierung der Motoransteuerung weiter reduziert werden.

Die Faktorstufe mit der höchsten eingestellten Vorschubkraft hatte die größte absolute mittlere Abweichung der Vorschubkraft. Die FK_3 mit der Soll-Vorschubkraft von 280 N hatte eine mittlere Abweichung von 0,7 N bei einer Standardabweichung von 0,5 N. Die Abweichungen der Vorschubkraft in dieser Studie sind sehr gering, verglichen mit Abweichungen der Vorschubkraft beim manuellen Hämmerbohren. In einer Studie mit 15 professionellen Anwendern und einer eingestellten Soll-Vorschubkraft von 200 N betrug die durchschnittliche Abweichung 2,2 N mit einer Standardabweichung von 8,1 N (Uhl et al., 2021). Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Vorschubkraft in dieser Studie mit dem automatisierten Bohrprüfstand konstant eingestellt werden konnte.

Die Erhöhung der Vorschubkraft von 120 N auf 280 N führte in der Vorstudie mit dem konventionellen Bohrhämmer zu einer Drehzahlrückung und damit zu einer Reduktion der Schlagfrequenz von 2,2 Hz, bzw. einer Reduktion der Bohrdrehzahl von 23,6 1/min. In dieser Studie wurde eine feste Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl vorgegeben. Die gemessene Abweichung war bei FK_3 am größten. Im Vergleich zur eingestellten Schlagfrequenz von 57,20 Hz wurde ein Wert von 57,11 Hz mit einer Standardabweichung von 0,04 Hz gemessen. Die Bohrdrehzahl (Sollwert 620,00 1/min) wurde mit 618,31 1/min bei einer Standardabweichung von 0,46 U/min gemessen. Dies bedeutet, dass der Motor-Controller die Drehzahlen nicht vollständig konstant halten konnte. Eine weitere Optimierung der Regelparameter könnte die Abweichungen verringern. Es ist daher notwendig, die geringe Abweichung der Motordrehzahlen in Relation zu der eingestellten Vorschubkraft zu diskutieren. Erst hierdurch kann entschieden werden, ob in der Studie die Motordrehzahlen, und damit die Schlagfrequenz, unabhängig von der Vorschubkraft eingestellt werden konnten.

Um die Abweichung der Motordrehzahlen zu vergleichen, wurde berechnet, welche äquivalente Erhöhung der Vorschubkraft den gleichen Effekt an Drehzahlrückung im Bohrhämmer Bosch GBH 4-32 zur Folge hätte. Für den Bohrhämmer Bosch GBH 4-32 führte eine Erhöhung der Vorschubkraft von 120 N auf 280 N zu einer Reduktion der Schlagfrequenz von 57,20 Hz auf 55,00 Hz. Eine Reduktion der Schlagfrequenz von 57,20 Hz auf 57,11 Hz würde folglich eintreten, wenn die Vorschubkraft von 120 N auf 126,4 N ansteigen würde. Eine Reduktion der Bohrdrehzahl von 620 1/min auf 618,31 1/min würde eintreten, wenn die Vorschubkraft von 120 N auf 131,12 N steigen würde. Diese maximale Abweichung von 11,12 N entspricht weniger als 7 % des Abstands der Faktorstufen von 120 N und 280 N. Es kann daher gesagt werden, dass die Motordrehzahlen, und damit die Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl, unabhängig von der Vorschubkraft eingestellt werden konnten.

Der prozentuale Abfall der Bohrdrehzahl in dieser Studie war größer als der prozentuale Abfall der Schlagfrequenz. Die zunehmende Bohrlochreibung über die Vorschubkraft führt zu einem steigenden Lastmoment am Bohrer, welches trotz konstanter Motoransteuerung zu einer geringen Reduktion der Drehzahl führte. In dieser Studie hatte das zunehmende Lastmoment am Bohrer aufgrund des getrennten Antriebsstrangs keinen mechanischen Einfluss auf das Schlagwerk. Die trotzdem abnehmende Schlagfrequenz in dieser Studie wurde daher nicht erwartet. Es wurde angenommen, dass beim Hammerbohren die Schlagfrequenz nur aufgrund des erhöhten Reibmoments im Bohrloch abnimmt (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023). Die Variation der Vorschubkraft muss daher auch die Energieübertragung im Schlagwerk beeinflusst haben, wodurch das erforderliche

Antriebsmoment des Schlagwerks erhöht wurde. Dies führte zu einer geringen Reduktion der Schlagfrequenz. Die erfasste Reduktion der Schlagfrequenz in dieser Studie war jedoch sehr gering. Daher kann festgehalten werden, dass die getrennte Einstellung von Schlagfrequenz und Vorschubkraft in dieser Studie möglich war.

5.3.2 Getrennter Effekt von Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Bohrgeschwindigkeit (ROP)

In diesem Unterkapitel wird der getrennte Effekt der Vorschubkraft und der Drehzahlrückung, und damit der Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl, auf die Bohrgeschwindigkeit diskutiert. Das gewählte Versuchsdesign ermöglichte es erstmalig, die eigentlich multikollinearen Faktoren getrennt einzustellen und hierüber die jeweiligen Effektanteile zu bestimmen. Die ROP stieg in dieser Studie mit zunehmender Vorschubkraft und sank durch die Drehzahlrückung. Sowohl die Vorschubkraft als auch die Drehzahlrückung hatten einen starken Effekt auf die ROP. Der Effekt der Vorschubkraft ($f = 0,66$) war größer als der systemspezifische Effekt der Drehzahlrückung ($f = 0,42$). Daraus lässt sich ableiten, dass eine Erhöhung der Vorschubkraft bei konventionellen Bohrhämmern die ROP erhöht. Dieser Effekt wird jedoch abgeschwächt durch die daraus resultierende, stets systemspezifische Reduktion der Schlagfrequenz und der Bohrdrehzahl.

Der Anstieg der ROP mit zunehmender Vorschubkraft steht im Einklang mit Studien von Hecker (1983b) und Uhl et al. (2019). Im Gegensatz zu Studien von Botti et al. (2020) und Schäfer (2018) gab es keine abnehmende oder konstante ROP bei hohen Vorschubkräften. Die Bonferroni-Korrektur ergab einen geringeren Anstieg der ROP im Bereich von 200 N bis 280 N im Vergleich zum Bereich von 120 N bis 200 N. Nach Uhl et al. (2022) und Hecker (1983b) kann es bei hohen Vorschubkräften zu einer Sättigung der ROP kommen, wenn das Bohrmehl durch den Bohrer nicht mehr abtransportiert werden kann (Hecker, 1983b; Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023). Die maximal erreichbare ROP ist daher begrenzt. Der geringere Anstieg im höheren Vorschubkraftbereich kann daher anzeigen, dass die ROP näher an der erreichbaren Grenze liegt. Eine Erhöhung der Vorschubkraft zur Steigerung der ROP ist daher nicht unbegrenzt möglich.

Die Drehzahlrückung in dieser Studie führte zu einem Rückgang der ROP. Konstante und abnehmende ROP Werte bei hohen Vorschubkräften in der Studie von Botti et al. (2020) und Schäfer (2018) können daher durch den dominanter werdenden Effektanteil aus der systemspezifischen Drehzahlrückung erklärt werden (Botti et al., 2020; Schäfer, 2018). Im Vergleich zu FK_2 und FK_5 deutet der signifikante Effekt bei ähnlicher Effektgröße der FK_7 auf einen linearen Effekt der Motordrehzahlen auf die ROP hin. Der Vergleich zwischen den Faktorstufen der

Motordrehzahlen in dieser Studie zeigte, dass eine Reduktion der Schlagfrequenz um 3,85 % (von 57,2 Hz auf 55,0 Hz) zu einer überproportionalen Abnahme der ROP um 11,09 % führte (von 4,89 mm/s² auf 4,35 mm/s²). Dies kann dadurch erklärt werden, dass neben der Schlagfrequenz auch die Einzelschlagenergie für die ROP relevant ist (Cronjäger & Jahn, 1985). Sinkt die Schlagfrequenz von 57,2 Hz auf 55 Hz, so verringert sich auch die Einzelschlagenergie des Schlagwerks von 4,43 J auf 4,05 J. Die resultiert zu einer Reduktion der Schlagleistung von 253,4 W auf 222,8 W, was 13,58 % entspricht. Sowohl die Reduktion der Schlagfrequenz als auch die Abnahme der Einzelschlagenergie sind systemspezifisch. Der systemspezifische Rückgang der Schlagleistung ist daher überproportional und variierte in verschiedenen Studien. Folglich ist der systemspezifische Effekt auf die ROP bei verschiedenen Bohrhämmern und Studien unterschiedlich. Dieser somit studienspezifische Effekt kann teils divergierende Ergebnisse zu Untersuchungen der Vorschubkraft beim Hammerbohren erklären, da in verschiedenen Studien auch verschiedene Bohrhämmer verwendet wurden. In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass dieser Effekt auf die ROP stark sein kann.

5.3.3 Getrennter Effekt von Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Vibrationsemission (a_{hv} -Wert)

Im Vergleich zu den ursprünglichen Bohrhämmerwerten liegen die gemessenen Werte am unteren Ende des angegebenen Bereichs. Das Gewicht eines Bohrhammers beeinflusst die Vibrationsemission (Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2023). Der Bohrhämmer *DualDrive* als Untersuchungsumgebung hatte ein um 0,7 kg höheres Gewicht im Vergleich zum nicht modifizierten Bohrhämmer Bosch GBH 4-32. Die etwas geringere Vibrationsemission könnte daher auf das höhere Gewicht zurückzuführen sein. Mit einem Gewicht von 5,4 kg liegt das Gewicht der Untersuchungsumgebung jedoch weiterhin im üblichen Gewichtsbereich für Bohrhämmer dieser Leistungsklasse. Die Untersuchungsumgebung *DualDrive* eignet sich daher für die Bewertung der Vibrationsemission beim Hammerbohren über den a_{hv} -Wert.

Die Vibrationsemission nahm mit zunehmender Vorschubkraft und steigender Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl in dieser Studie zu. Der Effekt eines steigenden a_{hv} -Wertes bei steigender Vorschubkraft in dieser automatisierten Bohrstudie wurde von Lindenmann et al. (2021) auch beim Hammerbohren mit professionellen Anwendern beobachtet. In dieser Studie hatte die Vorschubkraft einen starken Effekt auf den a_{hv} -Wert mit einer Effektgröße von $f = 1,03$. Der Anstieg des a_{hv} -Wertes war im Vorschubkraftbereich von 120 N bis 200 N größer als im Bereich von 200 N bis 280 N. Der Interaktionseffekt von Vorschubkraft und Motordrehzahlen der mehrfaktoriellen Varianzanalyse ist, wie in Tabelle 5.4 dargestellt, mit $p = ,057$

nahezu signifikant. Im Gegensatz dazu war dieser Interaktionseffekt auf die Produktivität mit $p = ,213$ größer und damit weiter von der Signifikanz entfernt, wie in Tabelle 5.3 dargestellt. Dies deutet darauf hin, dass der Effekt der Vorschubkraft auf den a_{hv} -Wert, im Gegensatz zur ROP, nichtlinear ist. Dies spiegelt sich auch im a_{hv} -Wert der FK₇ sieben wider, welche als zentraler Punkt im Versuchsdesign verwendet wurde. Trotz einer Änderung der Motordrehzahlen, im Vergleich zu FK₅, wurde kein Effekt auf den a_{hv} -Wert beobachtet.

Die steigende Vibrationsemission mit steigender Vorschubkraft in manuellen Studien lässt sich zum Teil durch die sich verändernde Steifigkeit im Hand-Arm-System erklären (Aldien et al., 2005; Marcotte et al., 2005). Diese Erkenntnisse aus manuellen Studien sind jedoch nicht auf diese Studie übertragbar, da ein Hand-Arm-Modell verwendet wurde. Die Vibrationsemission ist auch abhängig von der Entkopplung des verwendeten Bohrhammergriffs. Lindenmann et al. (2021) konnten zeigen, dass mit steigender Vorschubkraft die Entkopplung eines Bohrhammergriffs steifer werden kann. Dies hat einen Effekt auf die Griffbeschleunigung. Im Vergleich zu der Studie von Lindenmann et al. (2021) wurde in dieser Studie ein ähnlicher Bohrhammer verwendet. Es ist daher denkbar, dass der Effekt des steigenden a_{hv} -Wertes bei steigender Vorschubkraft zum Teil auf das progressive Federverhalten des Bohrhammergriffs zurückzuführen ist. Die Schwingungen werden über den Griff auf die Finger übertragen (Bovenzi, 1994; Gerhardsson et al., 2005; Poole et al., 2019). Die höhere Vorschubkraft führte zu steigenden dynamischen Kräften an der Hand (Zhang et al., 2021). Dieser zusätzliche Effekt wird mit dem a_{hv} -Wert nicht berücksichtigt. Zusammenfassend lässt sich daher festhalten, dass die Vorschubkraft einen nichtlinear ansteigenden starken Effekt auf die Vibrationsemission hat.

Der Effekt der Drehzahldrückung, und damit der Schlagfrequenz und Bohrdrehzahl, war schwach mit einer Effektgröße von $f = 0,21$. Dieser Effekt kann nicht allein durch eine reduzierte Schwingungsanregung erklärt werden. Die Schwingungsanregung und die Griffentkopplung von Bohrhämmern beeinflussen gemeinsam den a_{hv} -Wert (Andersson, 1990; Riederer, 1985). Mit reduzierten Motordrehzahlen ändert sich die Schwingungsanregung. Die Anregung durch die Schläge hat einen großen Anteil am a_{hv} -Wert und sind im gemessenen Vibrationssignal erkennbar (Riederer, 1985). Durch die reduzierte Schlagfrequenz treten zum einen weniger Schläge pro Sekunde auf. Zum anderen sind die jeweiligen Schläge schwächer. Dies führt gemeinsam zu einer geringeren Schwingungsanregung und damit zu einem geringeren a_{hv} -Wert. Die Schwingungsentkopplung hängt von der Schlagfrequenz ab, da diese die dominierende Anregungsfrequenz ist. Die Schlagfrequenz beeinflusst daher den Anteil der Schwingung, welche durch den Griff entkoppelt werden kann (Andersson, 1990). Da aber die Vorschubkraft die

Schwingungsentkopplung verändert, tritt ein Interaktionseffekt auf. Verschiedene Anregungsfrequenzen werden bei unterschiedlichen Vorschubkräften unterschiedlich stark entkoppelt. Diese Wechselwirkung hängt immer von der Griffentkopplung des verwendeten Bohrhammers ab und kann daher nicht verallgemeinert werden.

5.4 Einschränkungen der Studie

In dieser Studie wurde eine Konfiguration, bestehend aus einem Bohrhammer, einem Bohrer und einer Betonklasse, untersucht. Es sollten daher weitere Konfigurationen zu Validierungszwecken der Ergebnisse untersucht werden. Beispielsweise wurden die Effekte von Vorschubkraft und Motordrehzahlen auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission mit einem Bohrer des Durchmessers 16 mm untersucht. Eine Erhöhung der Vorschubkraft steigerte die Bohrgeschwindigkeit. Bei kleineren Bohrdurchmessern kann die Bohrmehlförderung ein produktivitätsbegrenzender Faktor sein (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023). In diesem Fall würde eine höhere Vorschubkraft nicht zu einer höheren Produktivität führen. Auch kann Bohrmehl im Bohrloch die Schläge beim Hammerbohren dämpfen und damit die Vibrationsemission beeinflussen (Hecker, 1983b; Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023). Die Ergebnisse dieser Studie sind daher nicht übertragbar, wenn beim Hammerbohren das Bohrmehl durch den Bohrer nicht ausreichend entfernt werden kann.

In dieser Studie wurden drei Stufen der Vorschubkraft und zwei Stufen der Motordrehzahlen untersucht. Mit einem zusätzlichen zentralen Punkt im Versuchsplan wurden sieben Faktorkombinationen untersucht. Erst diese feinere Unterteilung von Vorschubkraft und Motordrehzahlen in mehrere Faktorstufen würde es ermöglichen lokal optimale Betriebspunkte der Ergonomie zu identifizieren. Dies war in dieser Studie nicht möglich. Es konnte nur gezeigt werden, dass sowohl Vorschubkraft und Schlagfrequenz einen starken Effekt haben können und daher getrennt berücksichtigt werden sollten.

Der Einfluss auf den a_{hv} -Wert ist stark vom System abhängig, welches aus dem Anwender, dem Bohrhammer, dem Bohrer und dem Beton besteht. Daher sollte diese Studie mit menschlichen Anwendern wiederholt werden, um die Übertragbarkeit zu validieren. In dieser Studie wurde ein Hand-Arm-Modell verwendet. Im Gegensatz zu dem verwendeten Hand-Arm-Modell versteift sich das menschliche Hand-Arm-System bei einer höheren Vorschubkraft, was sich auf den a_{hv} -Wert auswirkt (Marcotte et al., 2005). Ein weiterer Unterschied zwischen den verwendeten Hand-Arm-Modellen und den Anwender ist die Kopplung mit dem

Bohrhammer. Wenn die Hand durch eine hohe Greifkraft stark an den Bohrhammer angekoppelt ist, werden höhere dynamische Kräfte und Energie auf die Hand übertragen (Dong et al., 2005; McDowell et al., 2007; Welcome et al., 2015; Zhang et al., 2021). Bei dem Hand-Arm-Modell wird der Bohrhammer mit Schrauben festgeklemmt, um einen festen Sitz mit einer hohen Kraft auf beiden Seiten des Griffs zu gewährleisten. Im Gegensatz zum menschlichen Anwender wirkt sich eine Änderung der Vorschubkraft nicht auf die Ankopplung aus, da die Verbindung sehr steif ist. Daher werden auch die übertragenen Schwingungen durch eine sich ändernde Greifkraft nicht beeinflusst.

5.5 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde untersucht, ob sich mit einer separaten konstanten Motoransteuerung für Bohrrotation und Schlagwerk die Korrelation zwischen der Schlagfrequenz und Vorschubkraft beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken auflösen lässt. Die Korrelation der Vorschubkraft mit der Schlagfrequenz resultiert aus der Drehzahlrückung des Antriebsmotors. In konventionellen Bohrhämmern ändert sich die Schlagfrequenz immer gemeinsam mit der Bohrdrehzahl. Daher wurde in dieser Studie die Bohrdrehzahl immer mit der Schlagfrequenz durch die Ansteuerung der zwei Motoren variiert. Mit der entwickelten Untersuchungsumgebung *DualDrive* wurde eine automatisierte Bohrstudie mit unabhängig eingestellter Vorschubkraft und Schlagfrequenz durchgeführt. Die Auswertung der erfassten Vorschubkraft und Schlagfrequenz bestätigte, dass diese mit der Untersuchungsumgebung *DualDrive* unabhängig voneinander eingestellt werden konnten. Hierdurch konnten in dieser Studie erstmalig die Effekte einer unabhängig eingestellten Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission bestimmt werden.

Die statistische Analyse der Bohrgeschwindigkeit dieser Studie ermöglichte die Beantwortung der **Untersuchungsfrage 1.1** „Welche Effekte haben unabhängig eingestellte Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Bohrgeschwindigkeit?“. Mit der mehrfaktoriellen Varianzanalyse wurde gezeigt, dass sowohl die Schlagfrequenz als auch die Vorschubkraft einen starken Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit haben.

Für die **Untersuchungsfrage 1.2** „Welche Effekte haben unabhängig eingestellte Schlagfrequenz und Vorschubkraft auf die Vibrationsemission?“ wurde der a_{nv} -Wert analysiert. Hier konnte ein starker Effekt der Vorschubkraft und ein schwacher Effekt der Schlagfrequenz gezeigt werden.

Durch die Messung der resultierenden Vorschubkraft, Motordrehzahlen und die erstmalige Bestimmung der Effekte konnte gezeigt werden, dass sich die Korrelation von Vorschubkraft und Schlagfrequenz beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken mit einer konstanten Motoransteuerung auflösen lässt. Dies beantwortet damit die **Forschungsfrage 1**: „Lässt sich mit einer konstanten Motoransteuerung die Korrelation zwischen der Schlagfrequenz und Vorschubkraft beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken auflösen?“.

Die hierbei gemessene konstante Schlagfrequenz über einen breiten Bereich der Vorschubkraft erfüllt die notwendige Voraussetzung zur Untersuchung der **Forschungsfrage 2** mit der Untersuchungsumgebung *DualDrive*. In dieser wird die Auflösung der Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie durch eine Motoransteuerung adressiert.

6 Auflösung der Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie

In diesem Kapitel wird die **Forschungsfrage 2** untersucht und beantwortet:

Forschungsfrage 2: Lässt sich mit einer konstanten, sowie mit der Schlagfrequenz zyklischen, Motoransteuerung die Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie in elektropneumatischen Schlagwerken auflösen?

Zu dieser Forschungsfrage gehören die folgenden Unterforschungsfragen:

Unterforschungsfrage 2.1: Hat die mit der Schlagfrequenz zyklische Motoransteuerung *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* einen Effekt auf den zyklischen Verlauf der Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen?

Unterforschungsfrage 2.2: Lässt sich mit der zyklischen Motoransteuerung *CIID* die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz einstellen?

Unterforschungsfrage 2.3: Hat eine mit *CIID* von der Schlagfrequenz unabhängig eingestellte Einzelschlagenergie beim Hammerbohren einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission?

Die nachfolgenden Inhalte dieses Kapitels zur Beantwortung der **Forschungsfrage 2** wurden vom Autor der vorliegenden Arbeit in

S. Zimprich, J. Reiser, F. Matter, J.H. Robens, S. Matthiesen, Optimizing Drilling Parameters: A Novel Cyclical Motor Control Concept to Adjust the Impact Energy Independently of the Frequency for Impact Mechanisms, (Zimprich et al., 2026)

veröffentlicht. Die Methode, Ergebnisse und Diskussion werden in großen Teilen unverändert wiedergegeben. Abbildungen und Abschnitte des nachfolgenden Textes basieren somit auf der genannten Veröffentlichung und wurden in übersetzter Form übernommen. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wird im Gegensatz zu den Abbildungen darauf verzichtet, die Texte gesondert zu kennzeichnen.

Die Untersuchungsumgebung *DualDrive* wird verwendet, um diese Fragen beantworten zu können. In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass die Untersuchungsumgebung *DualDrive* mit einer konstanten Motoransteuerung auch eine konstante Schlagfrequenz über einen breiten Bereich der Vorschubkraft einstellen kann. Um die Korrelation zwischen der Schlagfrequenz und der Einzelschlagenergie aufzulösen, wird eine Motoransteuerung entwickelt, welche die Einzelschlagenergie bei konstanter Schlagfrequenz variieren soll. Es gibt im Stand der Forschung Hinweise, dass dies mit einer zyklischen Motoransteuerung möglich sein könnte. Die Motoransteuerung wird daher eine mit der Schlagfrequenz zyklische Charakteristik aufweisen und nachfolgend *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* benannt. Über die Messung der Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen und Einstellungen mit *CIID* wird untersucht, ob die zyklische Motoransteuerung einen Effekt auf den zyklischen Verlauf der Motordrehzahl hat. Der Einfluss von *CIID* bei konstanter Schlagfrequenz auf die Einzelschlagenergie wird experimentell untersucht. Eine Änderung der Einzelschlagenergie bei konstanter Schlagfrequenz würde aufzeigen, dass sich die Korrelation durch eine konstante sowie zyklische Motoransteuerung auflösen lässt. Schließlich wird der Effekt einer mit *CIID* einstellbaren Einzelschlagenergie bei konstanter Schlagfrequenz auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission beim Hammerbohren untersucht.

6.1 Methode

Im Unterkapitel 6.1.1 wird die zyklische Motoransteuerung *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* vorgestellt. Diese soll die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz in elektropneumatischen Schlagwerken variieren. Zur experimentellen Untersuchung der Motoransteuerung wird die Untersuchungsumgebung *DualDrive* verwendet. Die Umsetzung der Motoransteuerung in der Untersuchungsumgebung wird im Unterkapitel 6.1.2 erläutert. Der Effekt der Motoransteuerung *CIID* auf die Einzelschlagenergie wird mit dem Messverfahren EPTA 05/2009 experimentell erfasst (Nalbach, 2009). Dieses Messverfahren und die durchgeführten Versuche werden in Unterkapitel 6.1.3 vorgestellt. Die automatisierte Bohrstudie zur Untersuchung einer von der Schlagfrequenz unabhängig eingestellten Einzelschlagenergie beim Hammerbohren wird im Unterkapitel 6.1.4 erläutert. Alle Datenauswertungen und statistischen Analysen zur Beantwortung der **Forschungsfrage 2** werden im Unterkapitel 6.1.5 eingeführt.

6.1.1 Zyklische Motoransteuerung CIID für elektropneumatische Schlagwerke

Über eine zyklische sowie konstante Motoransteuerung soll die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz variiert werden können. Die Idee der zyklischen Variation der Motordrehzahl mit der Schlagfrequenz basiert auf Studien von Lee et al. (2013) und Paulos und Yim (2013). Diese nutzen auch zyklische Motoransteuerungen für Schlagschrauber und Flugdrohnen. Wie auch Schlagschrauber (Lee et al., 2013) und die Rotoren der Studie von Paulos und Yim (2013) haben auch elektropneumatische Schlagwerke eine nicht starre Kopplung im Leistungsfluss. Durch die Charakteristik der Luftfeder im elektropneumatischen Schlagwerk verhält sich das Lastmoment mit der Schlagfrequenz auch zyklisch. Daher wird die Hypothese aufgestellt, dass durch eine zyklische Variation der Motordrehzahl mit der Schlagfrequenz die Einzelschlagenergie verändert werden kann.

Um zeigen zu können, dass mit einer Motoransteuerung die Korrelation der Einzelschlagenergie mit der Schlagfrequenz aufgelöst werden kann, muss die Einzelschlagenergie variiert werden, während die Schlagfrequenz konstant bleibt. Damit sich die Schlagfrequenz nicht ändert, muss die Motordrehzahl über eine Kurbelumdrehung gemittelt konstant bleiben. Die Motordrehzahl muss also gemittelt über eine ganze Kurbelumdrehung konstant, aber trotzdem innerhalb einer Kurbelumdrehung mit der Schlagfrequenz rotationsperiodisch veränderlich und damit zyklisch sein. Das Konzept einer mit der Schlagfrequenz zyklischen, aber dennoch über eine Kurbelumdrehung gemittelten konstanten Motordrehzahl ist in Abbildung 6.1 ohne Angabe von Absolutwerten zu sehen. Die zyklische Motordrehzahl ist im Vergleich zu einer konstanten Motordrehzahl aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Kurbel einmal pro Umdrehung für eine zyklische Motordrehzahl die gleiche Winkelposition erreicht wie bei einer konstanten Motordrehzahl. Dieser Zeitpunkt ist in Abbildung 6.1 rot markiert.

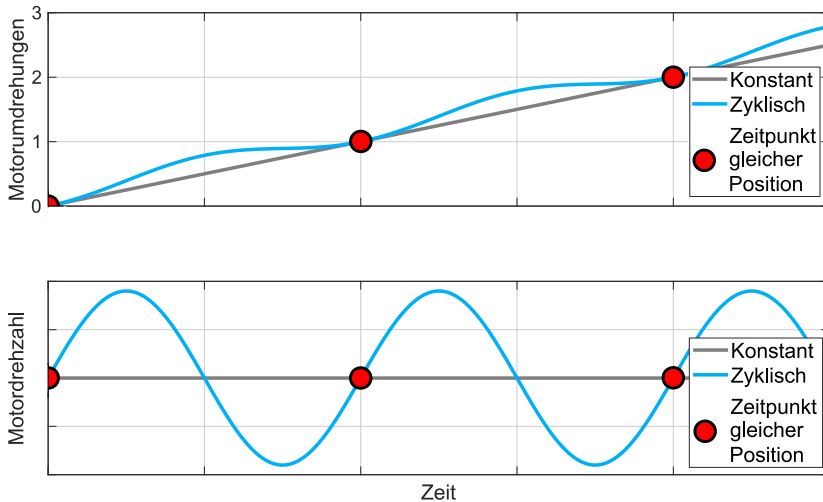


Abbildung 6.1: Konzept einer mit der Schlagfrequenz zyklischen, aber dennoch um eine Kurbelumdrehung konstanten, Motordrehzahl. (Zimprich et al., 2026)

Abbildung 6.2 skizziert schematisch ein elektropneumatisches Erregerkolbensschlagwerk. Der Antriebskolben ist über die Kurbel fest mit dem Motor verbunden. Die Drehzahl beeinflusst den Weg des Kolbens und indirekt über den Betriebspunkt des Schlagwerks auch die Position des Flugkolbens. Dies beeinflusst den Druckverlauf der Luftfeder und somit die Kraft F . Über die Luftfeder übt der Kolben somit zu jedem Zeitpunkt eine Kraft F auf den Flugkolben aus. Über die Kraft F wird der Flugkolben beschleunigt oder verzögert. Eine Veränderung der Kraft F hat daher eine Auswirkung auf die Geschwindigkeit des Flugkolbens zum Schlagzeitpunkt. Die Geschwindigkeit des Flugkolbens zum Schlagzeitpunkt ist entscheidend für die Einzelschlagenergie des elektropneumatischen Schlagwerks. Ändert man daher die Motordrehzahl, so ändert sich die Geschwindigkeit des Flugkolbens zum Schlagzeitpunkt und damit auch die Einzelschlagenergie. Lässt man dabei aber im Mittel die Motordrehzahl gleich, so wäre es möglich, die Schlagfrequenz konstant zu halten, während sich die Einzelschlagenergie ändert. Bisher werden elektropneumatische Schlagwerke konstant angesteuert.

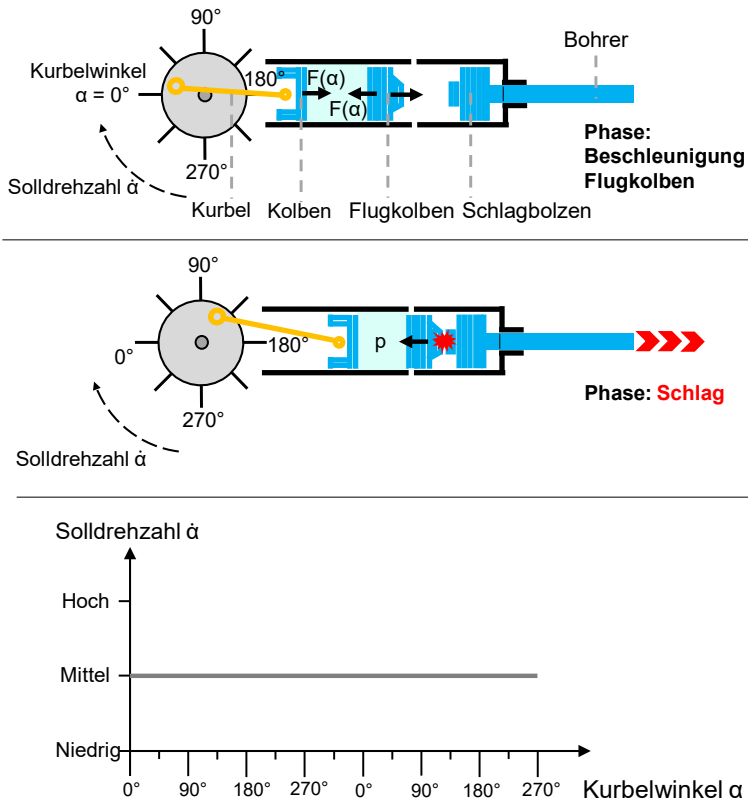


Abbildung 6.2: Die Drehzahl beeinflusst den Weg des Kolbens und indirekt die Position des Flugkolbens. Die Position des Flugkolbens wird indirekt über den Betriebspunkt des Schlagwerks beeinflusst. Dies beeinflusst den Druck p und damit die Kraft F und somit die Geschwindigkeit des Flugkolbens zum Schlagzeitpunkt. Die Geschwindigkeit zum Schlagzeitpunkt hat einen großen Effekt auf die Einzelschlagenergie. Bisher werden Schlagwerke konstant angesteuert. (Zimprich et al., 2026)

Die neue Motoransteuerung *CIID* gibt die Solldrehzahl $\dot{\alpha}$ in Abhängigkeit des Kurbelwinkels α vor. Bei jeder Kurbelumkehrung ändern sich die vorgegebenen Solldrehzahlen gleichbleibend. Die Motoransteuerung ist daher zyklisch. Damit unterscheidet sich die Ansteuerung von einer konstant vorgegebenen Solldrehzahl.

Die Vorgabe einer zyklischen Solldrehzahl unterscheidet *CIID* von dem Ansatz von Paulos und Yim (2013). Diese regelten zyklisch in Abhängigkeit des Motorwinkels das Motormoment. Dies ist für elektropneumatische Schlagwerke jedoch nicht zielführend. In der Studie von Paulos und Yim (2013) wirkte auf die Motoren, über Last der Rotorpropeller, ein relativ konstantes Lastmoment. Im Gegensatz hierzu schwanken die Lastmomente elektropneumatischer Schlagwerke sehr viel stärker (Wiedner, 2008). Diese starke Schwankung des Lastmomentes würde eine zyklische Regelung des Motormomentes schneller instabil werden lassen.

Die Motoransteuerung *CIID* unterscheidet sich gegenüber dem Ansatz von Lee et al. (2013) dahingehend, dass keine sinusförmige Motordrehzahl vorgegeben wird. In der Studie von Lee et al. (2013) wurde die sinusförmige Motordrehzahl als Verlauf vorgegeben. Nur so konnte die Korrelation von Schlagfrequenz und der Energie des Schlages aufgelöst werden. Das Erreichen einer sinusförmigen Motordrehzahl ist jedoch regelungstechnisch sehr aufwendig. Daher wird mit *CIID* nur zyklisch eine veränderliche Solldrehzahl vorgegeben.

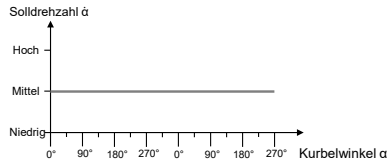
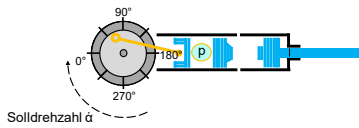
Mit *CIID* wird daher nicht das Motormoment oder die Drehzahl geregelt, sondern die Solldrehzahl wird zyklisch in Abhängigkeit des Kurbelwinkels vorgegeben. Die Motorregelung im Motor-Controller regelt den Motor dann auf die aktuell und sich zyklisch veränderlich vorgegebene Solldrehzahl. Dies hat Vorteile für die Stabilität der Motorregelung.

Die Motoransteuerung *CIID* ist, zusammen mit dem Vergleich zu einer konstant vorgegebenen Solldrehzahl, in Abbildung 6.3 gezeigt. Die Solldrehzahl $\dot{\alpha}$ wird zyklisch in Abhängigkeit des Winkels α vorgegeben. Für den Winkelursprung wurde der hintere Totpunkt der Kurbel als Winkel $\alpha = 0^\circ$ definiert. Der Winkel α steigt mit dem Uhrzeigersinn an. Innerhalb einer Kurbelumdrehung werden zwei Solldrehzahlen vorgegeben. Eine hohe Solldrehzahl und eine niedrige Solldrehzahl. Die Phase der hohen Solldrehzahl hat das Ziel, den Antriebskolben zu beschleunigen, während der Phase der niedrigen Solldrehzahl soll der Antriebskolben durch das Lastmoment abgebremst werden. Die Motoransteuerung *CIID* bremst den Motor in dieser Studie daher nicht aktiv. Es wird erwartet, dass im Vergleich zu dem reinen Abbremsen durch das Lastmoment mit einem aktiv gebremsten Motor die Motordrehzahl innerhalb einer Umdrehung stärker variiert werden könnte. Es wird vermutet, dass damit die Einzelschlagenergie bei konstanter Schlagfrequenz noch stärker variiert werden könnte. Dies wird jedoch in dieser Studie nicht untersucht. Die Motoransteuerung *CIID* mit aktiv gebremstem Motor würde Potential bieten für weitere, auf dieser Arbeit aufbauende, Untersuchungen.

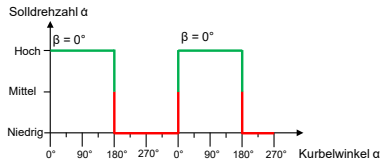
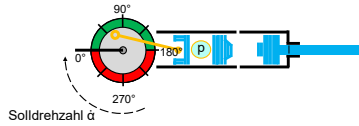
Der Beschleunigungswinkel β wurde als Startwinkel der hohen Solldrehzahl definiert. Mit dem Winkel β werden die Bereiche der hohen und niedrigen Solldrehzahl über den Kurbelwinkel verschoben. Dies verändert die dynamische Abstimmung im Schlagwerk und damit die resultierende Geschwindigkeit des Flugkolbens zum Schlagzeitpunkt. Mit dem Winkel β soll das Schlagwerk gezielt verstimmt werden, um unterschiedliche Einzelschlagenergien zu erreichen. Die hohen (grün) und niedrigen (rot) Solldrehzahlen werden jeweils über einen Bereich von 180° des Kurbelwinkels α dem Motor vorgegeben. Die mittlere resultierende Drehzahl liegt zwischen diesen beiden Vorgabewerten. Pro Kurbelumdrehung erfolgt ein Schlag. Die um eine Kurbelumdrehung gemittelte Motordrehzahl in der Einheit $1/s$ entspricht der Schlagfrequenz. Die resultierende Schlagfrequenz liegt somit zwischen den Schlagfrequenzen, welche der hohen und niedrigen Solldrehzahl entsprechen.

Die Motoransteuerung mit zwei verschiedenen Einstellungen des Beschleunigungswinkels β ist in Abbildung 6.3 dargestellt. In dieser Studie wurde die niedrige Solldrehzahl auf den Wert Null gesetzt, um eine hohe Differenz zwischen der hohen und der niedrigen Solldrehzahl zu erreichen. Dies soll eine hohe Variation der Motordrehzahl innerhalb einer Kurbelumdrehung erreichen.

Konstante Solldrehzahl



CIID: Beschleunigungswinkel $\beta = 0^\circ$



CIID: Beschleunigungswinkel $\beta = 135^\circ$

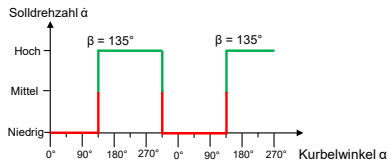
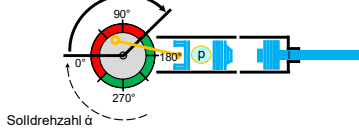


Abbildung 6.3: Eine konstante Vorgabe der Solldrehzahl im Vergleich zu einer zyklisch vorgegebenen Solldrehzahl in Abhängigkeit des Kurbelwinkels α mit *CIID*. In Abhängigkeit des Winkels wurde entweder eine hohe oder niedrige Solldrehzahl vorgegeben. Mit dem Beschleunigungswinkel β kann die Phase der Ansteuerung variiert werden, um hierüber gezielt die Einzelschlagenergie zu verändern. (Zimprich et al., 2026)

Die resultierende Motordrehzahl weicht von den vorgegebenen Solldrehzahlen ab, da das System Zeit benötigt, um die vorgegebene Solldrehzahl zu erreichen. Es ist unklar, ob und inwieweit die Motordrehzahl die Solldrehzahl erreicht, da die nächste Änderung der Solldrehzahl bereits nach einer halben Kurbelumdrehung erfolgt. Das Trägheitsmoment des Antriebsstrangs, die Trägheit des Motorreglers und das zyklische Lastmoment des elektropneumatischen Schlagwerks sind Unsicherheitsfaktoren für die schnelle und gezielte Änderung der Motordrehzahl. Es muss daher experimentell validiert werden, wie sich die resultierende Motordrehzahl bei einer zyklisch vorgegebenen Solldrehzahl ändert. Im nächsten Unterkapitel wird daher der Antriebsstrang des elektropneumatischen Schlagwerks in der Untersuchungsumgebung *DualDrive* im Detail vorgestellt. Mit dieser Untersuchungsumgebung kann der Effekt von *CIID* auf die resultierende Motordrehzahl, die Einzelschlagenergie, die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission untersucht werden.

6.1.2 Umsetzung der Motoransteuerung in der Untersuchungsumgebung DualDrive

Die Trennung des mechanisch gekoppelten Bohrerantriebsstrangs wurde in Kapitel 5.1.2 vorgestellt. Darauf aufbauend wird in diesem Unterkapitel der Antriebsstrang des Schlagwerks näher erläutert. Dieser entkoppelte Antriebsstrang erlaubt es, die Motoransteuerung des Schlagwerks zielgerichtet zu untersuchen, da es keine mechanischen Wechselwirkungseffekte zur Bohrrotation gibt. Die Untersuchungsumgebung wird daher dazu genutzt, um die zyklische Motoransteuerung *CIID* in dieser Studie detailliert zu untersuchen.

Die Nennleistung des drehzahlgeregelten Schlagmotors betrug 1820 W (Brushless Sensor Motor ESC 3-8S 270Kv 1820W). Diese hohe Leistungsreserve erlaubt schnelle Änderungen der Drehzahl im Betrieb trotz anliegendem Lastmoment. Der Kurbelwinkel α wurde mit dem Encoder AS5147P bei einer Auflösung von 1024 Pulsen pro Umdrehung erfasst (AS5x47P, ams AG, Premstaetten, Österreich). Über eine ABI Schnittstelle wurde der Kurbelwinkel vom Encoder an den Teensy Mikrocontroller übertragen (Teensy® 4.1 Development Board, PJRC.com LLC., Sherwood, OR, USA). Durch den direkten Antrieb der Kurbel durch den Motor entspricht der Kurbelwinkel dem Motorwinkel in der Untersuchungsumgebung. Basierend auf dem Kurbelwinkel α gab der Mikrocontroller dem Motorregler über den Motor-Controller (VESC 6 MkV, Trampa Boards Ltd, Nottingham, Vereinigtes Königreich) die Soll-drehzahl vor. Der Motor-Controller erfasst hierfür die Drehzahl über die drei Hall-Sensoren des Motors. Die interne Vektorregelung des Motor-Controllers regelt den Motor, basierend auf der Abweichung zwischen der erfassten Ist-Drehzahl und Soll-drehzahl. Da der Antriebsmotor eine Polpaarzahl von 7 hat, kann der Motor-Controller die Motorposition zusätzlich mit einer Auflösung von 42 Pulsen pro Umdrehung erfassen (vgl. Binder (2017)). Dies entspricht somit einer Winkelauflösung von $8,57^\circ$. Der gesamte Antriebsstrang des elektropneumatischen Schlagwerks ist in Abbildung 6.4 skizziert.

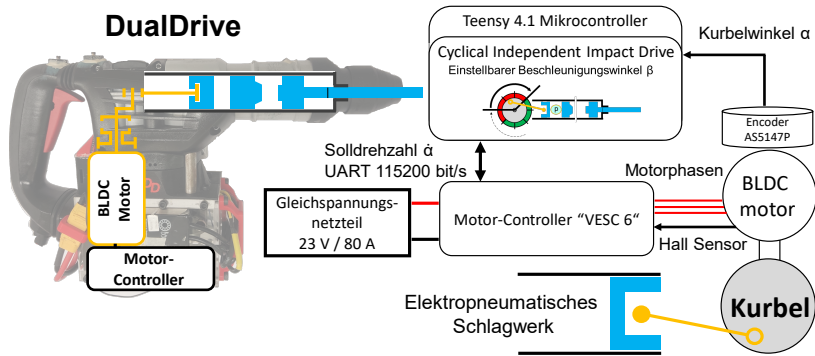


Abbildung 6.4: Antriebsstrang des elektropneumatischen Schlagwerks der Untersuchungsumgebung *DualDrive* zur Untersuchung der Motoransteuerung *CIID*. (Zimprich et al., 2026)

Die Regelung des Antriebsmotors reagiert auf die Abweichung zwischen der Soll Drehzahl und der Ist-Drehzahl des Motors. Damit die Motoransteuerung *CIID* einen Effekt auf die Einzelschlagenergie haben kann, ist es notwendig, dass die Ist-Drehzahl auf eine Änderung der Soll Drehzahl reagieren kann. Ist die Regelung aber sehr träge, so können Abweichungen der Drehzahl beim Wechsel der Soll Drehzahlen nicht schnell genug kompensiert werden. Da die Motoransteuerung *CIID* zweimal pro Motorumdrehung die Soll Drehzahl ändert, muss die Regelung schnell auf Abweichungen reagieren können. Dies führt jedoch zu einem Zielkonflikt.

Kommerzielle Bohrhämmer sind auf einen stabilen Betriebspunkt des Schlagwerks ausgelegt, da dies einen effizienten Bohrbetrieb erlaubt. Nur Untersuchungen mit einem stabilen Betriebspunkt sind daher repräsentativ für das Hammerbohren mit kommerziellen Bohrhämmern. Ein stabiler Betriebspunkt des Schlagwerks ist daher eine Randbedingung, um das Hammerbohren bezüglich der Einzelschlagenergie, der Bohrgeschwindigkeit und der Vibrationsemission untersuchen zu können. Für einen stabilen Betriebspunkt ist jedoch eine träge Regelung zielführend, da diese sehr tolerant gegenüber Störgrößen ist. Andererseits reagiert eine träge Regelung nur sehr wenig auf die zyklische Änderung der Soll Drehzahl. Dies steht dem Ziel der Motoransteuerung *CIID* entgegen, die Einzelschlagenergie durch eine zyklische Änderung der Motordrehzahl zu verändern. Es müssen daher Regelparameter gefunden werden, welche eine zyklische Änderung der Motordrehzahl ermöglichen und gleichzeitig einen stabilen Betriebspunkt gewährleisten.

Die Parameter der Vektorregelung wurden nach Ziegler-Nichols im Leerlaufbetrieb des Bohrhammers eingestellt (Ziegler & Nichols, 1942). Dies bedeutet, dass der Bohrhämmer nicht mit einer Vorschubkraft gegen ein Bohrwerkzeug gedrückt wurde. Die Luftfeder war hierbei nicht aktiv, sodass sich der Kolben frei drehen konnte. Der Antriebsmotor wurde daher nur durch die Trägheit des Schlagwerks, nicht aber durch die Kraft der Luftfeder, belastet. Die Motoransteuerung *CIID* wurde hierbei nicht verwendet. Die identifizierten Parameter dienten als Ausgangswerte zur Identifikation der Regelparameter für *CIID*.

Mit diesen Regelparametern wurde der Motor bei belastetem Schlagwerk und der Motoransteuerung *CIID* betrieben. Mit aktivem Schlagwerk wurde die Regelung bei der Ansteuerung *CIID* jedoch instabil, da das zyklische Lastmoment und die zyklische Vorgabe der Soll Drehzahl Störgrößen darstellen. Schrittweise wurden der proportionale Verstärkungsfaktor K_P und der derivative Verstärkungsfaktor K_D reduziert, bis sich ein stabiler Betrieb bei konstanter mittlerer Motordrehzahl einstellte. Die so ermittelten Regelparameter können die Motordrehzahl zyklisch verändern, erlauben aber gerade noch einen stabilen Betriebspunkt ist. Ob es unter Verwendung dieser Regelparameter mit der Motoransteuerung *CIID* möglich ist, auch die Einzelschlagenergie zu ändern, muss jedoch experimentell überprüft werden. Die verwendeten Regelparameter des Motor-Controllers sind im Anhang in der Tabelle A.1 aufgeführt.

6.1.3 Messverfahren zur Bestimmung der Einzelschlagenergie

Zur Beantwortung der **Unterforschungsfrage 2.2** wird die zyklische Motoransteuerung *CIID* bezüglich des Effektes auf die Einzelschlagenergie des elektropneumatischen Schlagwerks untersucht. Diese Einzelschlagenergie wird mit dem Messverfahren EPTA 05/2009 „Messung der Einzelschlagenergie von Bohr- und Meißelhämmern“ experimentell bestimmt (Nalbach, 2009). Das Messverfahren und die Anwendung in einer experimentellen Studie werden in diesem Unterkapitel vorgestellt.

Die Messung der Einzelschlagenergie mit einem normalen Bohrwerkzeug ist nicht möglich. Für die Messung der Einzelschlagenergie nach dem Messverfahren EPTA 05/2009 ist eine sog. Messstange notwendig. Diese Messstange besitzt an der oberen Seite eine SDS-plus Aufnahme zum Einstecken in den Bohrhämmer. Die untere Seite der Messstange ist flach und liegt an einem Betonblock an. Die Messstange hat die Länge l von 660 mm und hat den Durchmesser $d = 20$ mm. Sie wurde aus dem Stahl 34CrNiMo6 gefertigt und die SDS-plus Aufnahme wurde auf (57 + 3) HRC gehärtet. Zwei Dehnungsmessstreifen wurden an der Stelle $l_1 = 160$ mm in einer Vollbrückenkonfiguration (Typ 3/350XY13, Hottinger Brüel & Kjaer

GmbH, Darmstadt, Deutschland) an der Messstange angebracht. Die Messstange ist schematisch in Abbildung 6.5 dargestellt.

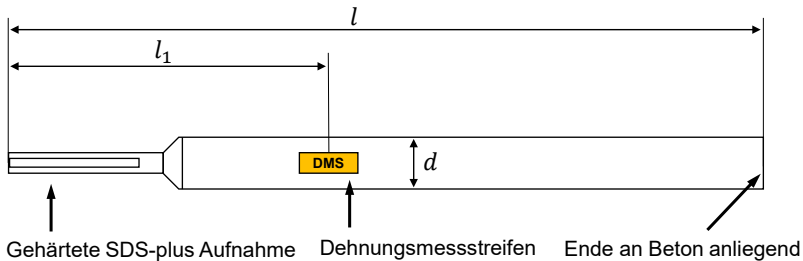


Abbildung 6.5: Skizze der verwendeten Messstange zur Bestimmung der Einzelschlagenergie in dieser Studie. (Zimprich et al., 2026)

Die Energie eines Schlages wird als Stoßwelle über die SDS-plus Aufnahme in die Stange eingeleitet. Die Messstange ist mit 660 mm lang genug, um die Stoßwelle eines Schlages an der Position der Dehnungsmessstreifen ohne Interferenz messen zu können (Hecker, 1986). Diese Interferenz entsteht, wenn an dem flachen Ende des Prüfstabs die Stoßwelle teilreflektiert wird. Der reflektierte Anteil der Welle wird wiederum von den Dehnungsmessstreifen als Zugwelle gemessen und führt zu Interferenzen. Die Länge von 660 mm erlaubt es die Stoßwelle vollständig zu messen, bevor die Zugwelle die Position der Dehnungsmessstreifen erreicht.

Der Anteil der Stoßwelle, welcher am Ende der Messstange nicht reflektiert wird, wird in den Betonblock transmittiert. Bei jedem Durchgang der Stoßwelle durch die Messstange wird ein Teil der Energie in den Beton übertragen, wodurch die Stoßwelle abklingt. Um die verschiedenen Schläge messen zu können, muss die Stoßwelle des vorherigen Schlages abgeklungen sein, damit hierdurch keine Interferenzen auftreten. Zum Zeitpunkt eines Schlages war die vorherige Stoßwelle ausreichend abgeklungen, da die direkt vor dem Schlag erfasste Dehnung weniger als 1 % der Einzelschlagenergie des vorherigen Schlages entsprach. Die verwendete Messstange war somit zur Messung der Einzelschlagenergie geeignet.

Das Signal der Dehnungsmessstreifen wurde mit einer Frequenz von 500 kHz mit einem LTTpro V4-Messsystem (Labortechnik Tasler GmbH, Würzburg, Deutschland) erfasst. Dieses Signal wurde mit einem Butterworth Filter 4. Ordnung ohne Phasenverzug und einer Grenzfrequenz von 100 kHz tiefpassgefiltert. Diese hohe Abtastfrequenz ist erforderlich, da sich longitudinale Stoßwellen in Stahl mit der Schallgeschwindigkeit von ca. 5180 m/s ausbreiten.

Vor jedem Versuch wurde das Schlagwerk des Bohrhammers mit einer Warmlaufphase von etwa 10 Min. vorgewärmt (DIN EN ISO 28927-10:2011). In den Versuchen zur Bestimmung der Einzelschlagenergie wurde der Bohrhämmer *DualDrive* mit der Messstange und einer Vorschubkraft gegen Beton vertikal nach unten gedrückt. Dies gewährleistete einen stabilen Arbeitspunkt, da eine Mindestvorschubkraft erforderlich ist, damit ein elektropneumatisches Schlagwerk ordnungsgemäß funktioniert. Mit einer Waage wurde überprüft, ob die erforderliche Mindestvorschubkraft eingehalten wurde. Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurde der Bohrhämmer *DualDrive* im Meißelmodus verwendet. Eine Rotation des Bohrwerkzeugs würde eine Beschädigung der Verkabelung der Dehnungsmessstreifen an der Messstange zur Folge haben. Das verwendete Messverfahren ist in Abbildung 6.6 dargestellt.

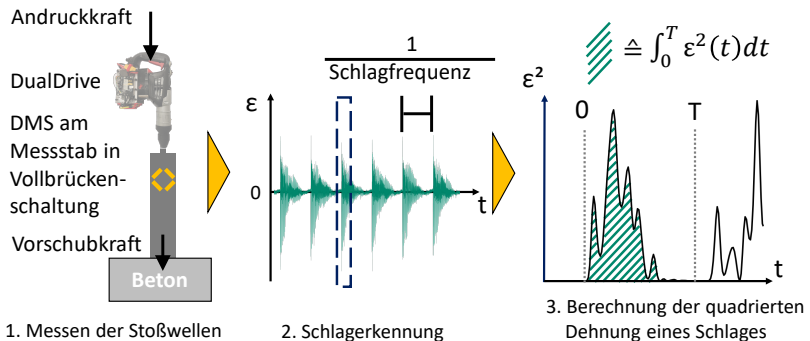


Abbildung 6.6: Das Messverfahren zur Bestimmung der Einzelschlagenergie in dieser Studie. An der Messstange wurden Dehnungsmessstreifen angebracht. Aus der gemessenen Dehnung wurde die Einzelschlagenergie nach Formel 6.1 berechnet. (Zimprich et al., 2026)

Nach der Erfassung des Messsignals wurden die einzelnen Schläge identifiziert. Für diese Schläge wurde die Dehnung der Stoßwelle gemessen und quadriert. Dies ist als grüne Fläche in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Grenzen 0 und T der erfassten quadrierten Dehnung wurden nach dem Messverfahren EPTA 05/2009 berechnet. Die Grenzen reichen vom Start der gemessenen Druckwelle des Schlages bis zur ersten teilreflektierten Zugwelle. Mit Formel 6.1 wurde die Einzelschlagenergie E unter Berücksichtigung der gemessenen Dehnung ϵ , der Querschnittsfläche A der

Messstange, der spezifischen akustischen Impedanz l^1 und des Elastizitätsmoduls E von Stahl berechnet. Die Einzelschlagenergie trägt die Einheit Joule.

$$EE = \frac{A * E^2}{I} \int_0^T \varepsilon^2(t) dt \quad 6.1$$

Die Versuche wurden mit einer Dauer von 60 Sekunden durchgeführt. In diesen 60 Sekunden wurden die Einzelschlagenergie und die Schlagfrequenz von sechs verschiedenen Motoransteuerungen gemessen. Zuerst wurde in jedem Versuch für zehn Sekunden eine konstante Motoransteuerung eingestellt. Dies entspricht dem aktuellen Stand der Technik zum Antrieb elektropneumatischer Schlagwerke. Die hier ermittelte Einzelschlagenergie dient als Referenz für die mit der neuen Motoransteuerung *CIID* erreichten Werte.

Nach zehn Sekunden Versuchszeit schaltete die Motoransteuerung auf eine mit *CIID* zyklisch eingestellte Solldrehzahl. Für die Dauer von zehn Sekunden wurde der Beschleunigungswinkel $\beta = 0^\circ$ eingestellt. Nach 20 Sekunden Versuchszeit wurde der Beschleunigungswinkel β auf 45° geändert. Der Beschleunigungswinkel β wurde anschließend alle zehn Sekunden um 45° erhöht, bis der Versuch nach 60 Sekunden beendet war.

Todorov et al. (2010) stellten fest, dass die ersten Schläge einer Messung nicht in die Auswertung der Einzelschlagenergie einfließen dürfen. In dieser Phase ist das elektropneumatische Schlagwerk nicht in einem konstanten Betriebspunkt, was die Schläge beeinflusst und damit die Messung verzerrt (Todorov et al., 2010). Zu Beginn einer Messung und bei einer Änderung der Ansteuerung benötigt das elektropneumatische Schlagwerk einige Sekunden, um einen konstanten Betriebspunkt zu erreichen. Aus diesem Grund wurden nur die letzten fünf Sekunden jeder untersuchten Motoransteuerung ausgewertet (blaue Bereiche in Abbildung 6.7). Die untersuchten Motoransteuerungen und die ausgewerteten Zeitfenster sind in Abbildung 6.7 dargestellt.

¹ Die spezifische akustische Impedanz bezeichnet den Wellenwiderstand. Sie berechnet sich aus dem Produkt von Dichte und Schallgeschwindigkeit in Ausbreitungsrichtung des Materials, in welchem sich die Wellen ausbreiten.

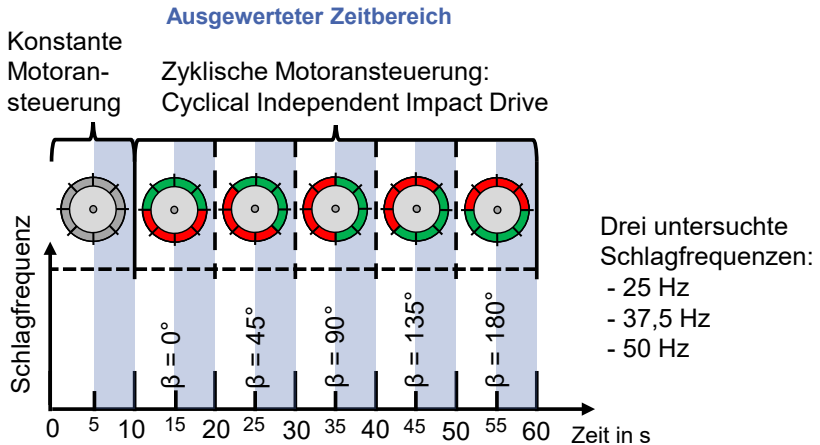


Abbildung 6.7: Sechs Einstellungen der Motoransteuerung wurden nacheinander in einem Versuch untersucht. Die blauen Zeitfenster wurden bezüglich der Einzelschlagenergie und der Schlagfrequenz ausgewertet. In den Versuchen wurden die eingestellten Schlagfrequenzen 25 Hz, 37,5 Hz und 50 Hz untersucht. (Zimprich et al., 2026)

Die Einzelschlagenergie wird bisher hauptsächlich über die Schlagfrequenz beeinflusst, da diese zwei Faktoren multikollinear sind. Die zyklische Motoransteuerung wurde daher bei drei verschiedenen Schlagfrequenzen untersucht: 25 Hz, 37,5 Hz und 50 Hz. Die Faktorstufen bilden einen breiten Betriebsbereich des elektropneumatischen Schlagwerks ab. In den Versuchen wurden die resultierende Motordrehzahl und der Motorwinkel, und somit der Kurbelwinkel, von dem Motor-Controller gemessen. Hiermit wurde der Effekt der Motoransteuerung auf die resultierende Motordrehzahl und damit der Effekt auf die Abstimmung im Schlagwerk bestimmt. Dies ermöglicht die Bewertung des Effektes der Motoransteuerung auf die tatsächliche Motordrehzahl und auf die dynamische Abstimmung des Schlagwerks. Die Stromaufnahme wurde in den Versuchen über den Motor-Controller gemessen. Die Motor-Controller haben eine maximale Abtastfrequenz von 200 Hz.

6.1.4 Bohrstudie zum Effekt von CIID auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission

Neben dem Effekt auf die Einzelschlagenergie wird die zyklische Motoransteuerung *CIID* bezüglich des Effektes auf die Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission untersucht. Dies Untersuchung soll die **Unterforschungsfrage 2.3** beantworten. Eine Bohrstudie wurde hierfür auf dem von Uhl et al. vorgestellten Prüfstand durchgeführt (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023; Uhl, Robens, Gauch, Germann et al., 2023). Bei dieser Bohrstudie wurde die Schlagfrequenz konstant gehalten. Die Einzelschlagenergie wurde als Faktor unabhängig eingestellt. Die drei Faktorstufen stellen eine geringe, mittlere und hohe Einzelschlagenergie dar. In dieser Studie wurde die Einzelschlagenergie bei konstanter Schlagfrequenz durch die Motoransteuerung geändert. Die Faktorstufe „mittlere Einzelschlagenergie“ soll durch eine konstante Solldrehzahl eingestellt werden. Die Faktorstufen „geringe Einzelschlagenergie“ und „hohe Einzelschlagenergie“ sollen durch die zyklische Motoransteuerung *CIID* mit den niedrigsten und höchsten Einzelschlagenergien bei gleicher Schlagfrequenz eingestellt werden. In dieser Studie wurden 30 Löcher gebohrt. Jeder Faktor wurde daher mit zehn Bohrungen untersucht. In Abbildung 6.1 sind die drei eingestellten Faktorstufen der Bohrstudie dargestellt.

Tabelle 6.1: In der Bohrstudie eingestellte Faktorstufen der Einzelschlagenergie mit der dazugehörigen Versuchsanzahl und der konstanten Einstellung von Vorschubkraft und Schlagfrequenz

Einzelschlagenergie Motoransteuerung	Faktorstufe		
	Gering <i>CIID</i>	Mittel Konstant	Hoch <i>CIID</i>
Vorschubkraft	200 N	200 N	200 N
Schlagfrequenz	25 Hz	25 Hz	25 Hz
Anzahl der Bohrungen	10	10	10

Um Trendeffekte der Versuchsdauer über den Versuchsplan zu vermischen, wurde die Versuchsreihenfolge der drei Faktorkombinationen randomisiert. Zusätzlich wurden die Positionen der Bohrlöcher über den Betonblock randomisiert. Hierdurch werden mögliche Trendeffekte des zu bohrenden Betons über den Versuchsplan vermischt. Vor dem ersten Versuch wurde der Bohrhammer mit einer Warmlaufphase von etwa 10 Min. auf Temperatur gebracht (DIN EN ISO 28927-10:2011). Die Gehäusetemperatur des Bohrhammers wurde auch in dieser Studie

mit einem Temperatursensor überwacht (Modell TJC100-ICSSM050U-150, OMEGA Engineering GmbH, Deckenpfronn, Deutschland).

Alle Bohrungen der Bohrstudie wurden mit einer Schlagfrequenz von 25 Hz durchgeführt. Diese Schlagfrequenz ist zwar geringer als die nominelle Schlagfrequenz des elektropneumatischen Schlagwerks, jedoch wurde diese Schlagfrequenz gewählt, da hier durch die Erfahrungen der Parametrisierung des Reglers eine geringe Streuung der Einzelschlagenergie erwartet wurde. Die geringe Streuung der Einzelschlagenergie in den Versuchen ist erforderlich, um statistisch belastbare Versuchsergebnisse bei gleichzeitig vertretbarem Versuchsaufwand zu erhalten. Da der Umsetzwinkel einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission hat, wurde darauf geachtet den Umsetzwinkel in dieser Studie konstant zu halten. Für die Rotation des Bohrers wurde daher eine konstante Söldrehzahl des Motors 271 U/min vorgegeben. Diese Drehzahl entspricht der Bohrdrehzahl des Bohrhammers Bosch GBH 4-32 bei einer Schlagfrequenz von 25 Hz. Durch dieses Verhältnis entspricht der Umsetzwinkel in den Bohrversuchen dem originalen Umsetzwinkel des Bohrhammers Bosch GBH 4-32. Um die Versuchsvarianz weiter zu reduzieren, wurden die Bohrlöcher in Normbeton der Druckfestigkeitsklasse C50/60 mit den Abmessungen 800x800x300 mm³ gebohrt (Betonprüfkörper C50/60, Rau-Betonfertigteile, Ebhausen, Deutschland) (DIN EN 206:2021-06).

Zur weiteren Reduktion der Versuchsvarianz wurde ein sechssachsiger Roboter zum Bohren der Löcher eingesetzt (Modell KR 500 R2830 MT, KUKA, Augsburg, Deutschland). Der Versuchsaufbau entspricht hier dem Versuchsaufbau zur Beantwortung der **Forschungsfrage 1** in Kapitel 5.1.3 (vgl. Seite 62). Der Roboter regelte die erforderliche konstante Vorschubkraft auf 200 N. Diese Vorschubkraft gewährleistete einen konstanten Betriebspunkt des elektropneumatischen Schlagwerks (DIN EN ISO 28927-10:2011; Nalbach, 2009). Der Bohrhammer wurde wieder mithilfe des translatorischen Hand-Arm-Modells nach Jahn und Hesse (1986) zur Abbildung der menschlichen Impedanz im Roboter eingespannt. Die Vibrationsemission wurde auch hier anhand des a_{hv} Wertes nach der DIN EN ISO 28927-10:2011 und der DIN EN ISO 5349-1:2001 bewertet. Die Vibration wurde mit einem triaxialen Beschleunigungssensor gemessen (Modell 356A02, PCB Piezotronics, Depew, NY, USA). Dieser wurde an der in der DIN EN ISO 28927-10:2011 empfohlenen Position am Hauptgriff angebracht. Der Prüfstand mit dem eingespannten Bohrhammer *DualDrive* ist in Abbildung 6.8 dargestellt.

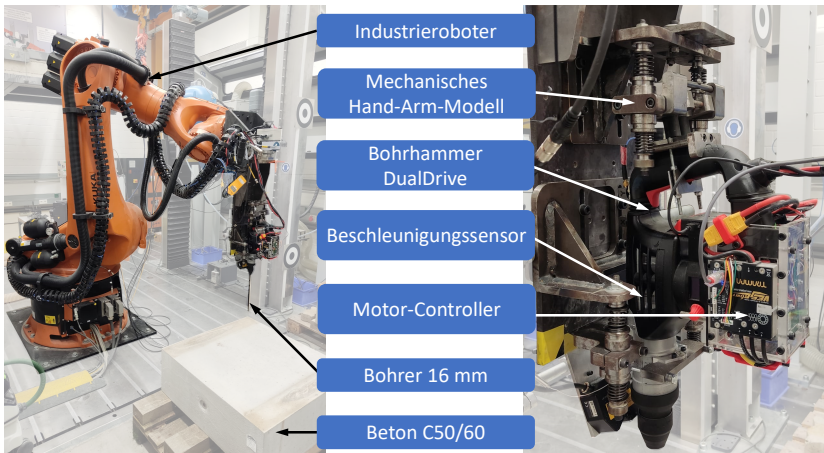


Abbildung 6.8: Prüfstand der automatisierten Bohrstudie zur Bestimmung der Effekte auf die Vibrationsemission und Bohrgeschwindigkeit. Die Nutzung des Prüfstandes erlaubt die Reduktion der Versuchsstreuung, da Bohrlöcher reproduzierbar gebohrt werden können. (Zimprich et al., 2026)

Die Regelung und Datenerfassung erfolgte bei einer Aufzeichnungsfrequenz von 12,5 kHz mit einem ADwin-Pro II System (Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH, Lorsch, Deutschland). Als Bohrwerkzeug wurde der gleiche vierschneidige Bohrer wie in der **Forschungsfrage 1** verwendet (Modell DeWalt DT9680 QZ-SDS+FHC 16 mm x 150 mm, DEWALT Deutschland, Idstein, Deutschland). Die Bohrlöcher wurden bis zu einer Tiefe von 45 mm gebohrt. Für den Bohrfortschritt wurde der Bohrweg s durch die Bohrzeit t geteilt. Der Bohrweg wird indirekt über die Tool Center Point Position des Roboters bestimmt. Bei der Bohrtiefe 15 mm wird ein konstantes Niveau der Vorschubkraft erreicht. Wie in Kapitel 5.1.4 ausgeführt ist ein konstantes Niveau der Vorschubkraft notwendig für die Bewertung der Bohrgeschwindigkeit mit dem in dieser Studie verwendeten Prüfstand (Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023). Daher erfolgt die Auswertung ab einer Bohrtiefe von 15 mm. Um die Bohrgeschwindigkeit über die ROP zu bewerten, wurde nach Formel 6.2 der Bohrfortschritt s durch die Bohrzeit t geteilt.

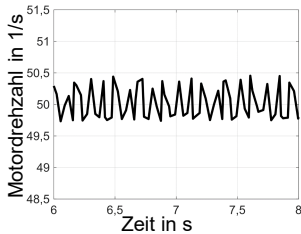
$$ROP = \frac{45 \text{ mm} - 15 \text{ mm}}{t(s = 45 \text{ mm}) - t(s = 15 \text{ mm})} \quad 6.2$$

6.1.5 Datenauswertung zur Untersuchung der zyklischen Motoransteuerung CIID

Alle Datenanalysen und Berechnungen wurden mit Matlab R2022b (Matlab R2022b, The MathWorks, Natick, MA, USA) durchgeführt. Für die statistische Auswertung wurde SPSS verwendet (IBM SPSS Statistics 25, IBM, Armonk, NY, USA).

Für **Untersuchungsfrage 2.1** wird der Effekt der Motoransteuerung auf die resultierende Motordrehzahl ausgewertet. Dies soll die Frage beantworten, ob eine zyklisch vorgegebene Soll Drehzahl einen Effekt auf die resultierende Motordrehzahl hat. Die Motordrehzahl des elektropneumatischen Schlagwerks wird über den Motor-Controller erfasst. Die maximale Abtastfrequenz des Motor-Controllers mit 200 Hz ist jedoch zu gering, um eine zyklische Schwingung der Motordrehzahl mit der Schlagfrequenz 50 Hz im Zeitbereich geeignet aufzulösen. Verschiebungen der minimalen oder maximalen Motordrehzahl durch die Motoransteuerung könnten so nicht aufgelöst werden. Eine Betrachtung der Motordrehzahl über die Zeit ist daher nicht geeignet, um den Effekt der zyklisch vorgegebenen Soll Drehzahl auf die resultierende Motordrehzahl zu bewerten.

Der Motor-Controller berechnet die Motordrehzahl aus den Hall-Sensoren des Motors. Zusätzlich ist über die Hall-Sensoren zeitgleich die Winkelposition des Motors bekannt. Da die Winkelposition des Motors bekannt ist, ist durch die direkte mechanische Kopplung auch der Kurbelwinkel bekannt. Zu jedem Wert der Motordrehzahl ist daher auch der aktuelle Kurbelwinkel bekannt. In einem stabilen Betriebspunkt muss ein zyklischer Effekt gleichbleibend periodisch und damit bei jeder Kurbelumdrehung auftreten. Wird die Motordrehzahl daher über den Kurbelwinkel aufgetragen, so ergibt sich ein kontinuierlicher Verlauf. Durch die zyklische Charakteristik des Effektes ist es daher möglich, diesen Effekt trotz geringer Abtastfrequenz auszuwerten. Ändert sich die zyklische Charakteristik der Motordrehzahl über den Kurbelwinkel, so kann gesagt werden, dass die zyklische Motoransteuerung *CIID* einen Effekt auf die Motordrehzahl hat. Für diese Auswertung werden die erfassten Motordrehzahlen und Winkelpositionen der sechs blauen Zeitfenster verschiedener Motoransteuerungen (siehe Abbildung 6.7) jedes Versuches verwendet. Dieses Auswertekonzept ist in Abbildung 6.9 dargestellt.



Problem: Bewertung der zyklischen Motordrehzahl im Zeitbereich ist durch die geringe Abtastfrequenz nicht möglich

Ansatz: Bewertung der zyklischen Motordrehzahl über den Kurbelwinkel

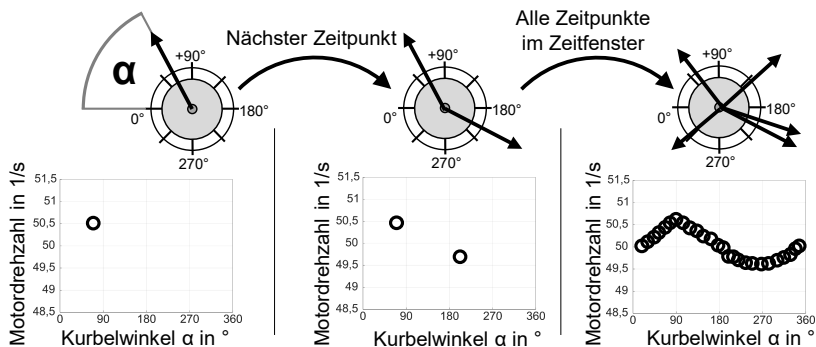


Abbildung 6.9: Auswertung der Motordrehzahl über den Kurbelwinkel zur Bewertung des zyklischen Effektes der Motoransteuerung. (Zimprich et al., 2026)

Zur Bewertung der unabhängigen Einstellung der Einzelschlagenergie durch *CIID* wurden die auftretenden Schläge für die sechs blauen Zeitfenster mit verschiedener Motoransteuerung (siehe Abbildung 6.7) eines Zeitfensters ermittelt. Als Zielgrößen wurden die Einzelschlagenergie und die Schlagfrequenz berechnet. Aus diesen Werten wurden der Mittelwert und die Standardabweichung für jeden der sechs Bereiche berechnet. Über die Standardabweichungen soll die Stabilität des Betriebspunktes des elektropneumatischen Schlagwerks bewertet werden. Zusätzlich wurden für die sechs Bereiche der Mittelwert und die Standardabweichung der Stromaufnahme berechnet.

Um Effekte zwischen den verschiedenen Motoransteuerungen auf die Einzelschlagenergie nachzuweisen, wurden die Daten mit einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse analysiert. Um diesen statistischen Test durchführen zu können, ist eine Homogenität der Varianz in den Daten erforderlich. Zur Untersuchung der Daten auf Varianzheterogenität wurde der Levene-Test verwendet. Wird mit

diesem Test eine Inhomogenität der Varianz in den Daten festgestellt, so muss anstatt der mehrfaktoriellen Varianzanalyse die Welch-ANOVA durchgeführt werden. Die mehrfaktoriellen Varianzanalyse oder die Welch-ANOVA können nur zeigen, dass ein signifikanter Effekt in den sechs Motoransteuerungen besteht. Es wird nicht gezeigt, welche der sechs Motoransteuerungen sich bezüglich der Einzelschlagenergie signifikant unterscheiden. Um dies zu identifizieren, wurden Post-hoc-Tests durchgeführt. Der Bonferroni-Test und der Games-Howell Test wurden gewählt, um Unterschiede zwischen den einzelnen Motoransteuerungen aufzuzeigen. Der Bonferroni-Test wurde gewählt, da er sehr trennscharf ist, jedoch setzt er Varianzhomogenität voraus. Der Games-Howell Test erfordert weder Varianzhomogenität noch den gleichen Stichprobenumfang in der Testgruppe, ist jedoch weniger trennscharf (Keselman & Rogan, 1978).

Zur Bewertung des Effektes von *CIID* auf die Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission wurden die ROP- und a_{nV} -Werte statistisch ausgewertet. Um die drei Faktorstufen mit der mehrfaktoriellen Varianzanalyse untersuchen zu können, müssen für die Werte innerhalb der drei Faktorstufen eine Normalverteilung und Varianzhomogenität vorliegen. Eine mögliche Abweichung von der Normalverteilung wird mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft. Die Varianzhomogenität wird mit dem Levene-Test untersucht. Die mehrfaktoriellen Varianzanalyse kann nur anzeigen, ob es innerhalb der drei Faktorstufen einen Unterschied gibt. Sie liefert aber nicht die Information, welche der jeweiligen Faktorstufen sich signifikant voneinander unterscheiden. Zu diesem Zweck werden die Daten mit dem Bonferroni Post-hoc-Test analysiert.

6.2 Ergebnisse

Im ersten Unterkapitel wird untersucht, ob eine zyklisch vorgegebene Solldrehzahl mit der Motoransteuerung *CIID* einen Effekt auf die resultierende Motordrehzahl hat. Dies wird bei verschiedenen Schlagfrequenzen untersucht und ist eine Voraussetzung, dass mit *CIID* Einfluss auf die Einzelschlagenergie genommen werden kann. Der Effekt der zyklischen Motoransteuerung *CIID* auf die Einzelschlagenergie wird dann im zweiten Unterkapitel untersucht. Der Effekt einer mit *CIID* von der Schlagfrequenz unabhängig eingestellten Einzelschlagenergie im Bohrprozess auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission wird im dritten Unterkapitel untersucht. Jedes **Unterkapitel** lässt sich somit einer der **Unterforschungsfragen** der **Forschungsfrage 2** zuordnen.

6.2.1 Einfluss von *CIID* auf die Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen

Die Motoransteuerung *CIID* zielt darauf ab, die Korrelation zwischen der Einzelschlagenergie und Schlagfrequenz im elektropneumatischen Schlagwerk aufzulösen. Um dies zu zeigen, soll in dieser Studie die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz verändert werden. Die Solldrehzahl wurde mit der Motoransteuerung zyklisch geändert. Dies soll die dynamische Abstimmung im Schlagwerk und folglich auch die Einzelschlagenergie verändern. Es muss daher untersucht werden, ob eine zyklische Vorgabe der Solldrehzahl einen Effekt auf die resultierende Motordrehzahl hat. In Abbildung 6.10 sind die resultierenden Motordrehzahlen über den Kurbelwinkel α aufgetragen. Der Kurbelwinkel α reicht von null bis 360° , was einer mechanischen Kurbelumdrehung entspricht. Die gemessenen Motordrehzahlen sind die konstante Motoransteuerung und für zwei Einstellungen mit *CIID* (Beschleunigungswinkel $\beta = 0^\circ$ und $\beta = 180^\circ$) bei drei Schlagfrequenzen aufgetragen. Die gemessenen Motordrehzahlen stammen aus den jeweils ausgewerteten Zeitbereichen der Versuche zur Bestimmung der Einzelschlagenergie (siehe Abbildung 6.7).

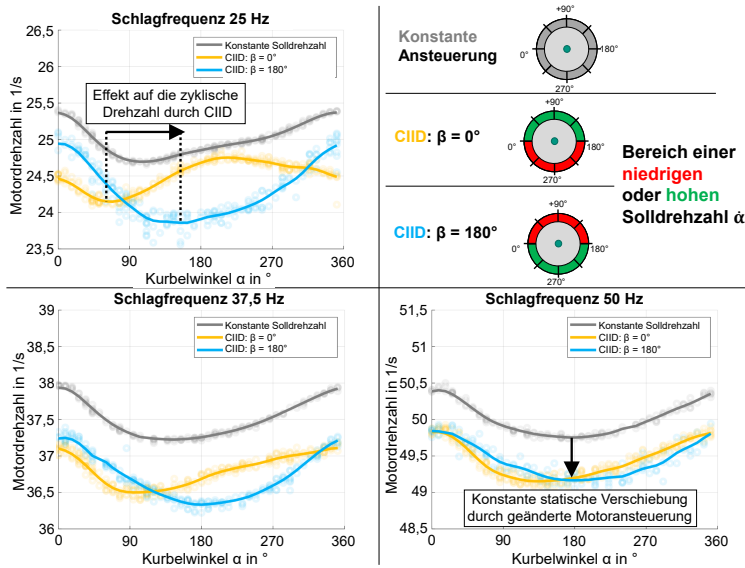


Abbildung 6.10: Gemessene Motordrehzahlen, aufgetragen über den Kurbelwinkel α . Durch den zyklischen Verlauf der Motordrehzahl über den Kurbelwinkel ergibt sich ein kontinuierlicher Verlauf. Auch bei konstant vorgegebener Soll-drehzahl (grau) ergibt sich ein zyklischer Verlauf. Die Motoransteuerung $CIID$ (gelb und blau) ermöglicht die Variation der zyklischen Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen. (Zimprich et al., 2026)

Es ist zu erkennen, dass sich die Motordrehzahlen zyklisch mit dem Kurbelwinkel α ändern. Auch bei der Vorgabe einer konstanten Soll-drehzahl (grau) änderte sich die Motordrehzahl zyklisch. Durch $CIID$ ändert sich die Ausprägung der zyklischen Charakteristik. Grafisch kann erahnt werden, dass bei einer zyklischen Ansteuerung die Streuung leicht steigt. Die mit der Motoransteuerung $CIID$ gemessenen mittleren Motordrehzahlen waren etwas geringer als die einer konstanten Soll-drehzahl. Für die untersuchte Schlagfrequenz 25 Hz unterschieden sich die Motordrehzahlen bei den Beschleunigungswinkeln $\beta = 0^\circ$ (gelb) und $\beta = 180^\circ$ am stärksten. Während die Motoransteuerung mit $\beta = 0^\circ$ die höchste Drehzahl bei etwa 210° hatte, erreichte der Motor mit $\beta = 180^\circ$ die höchste Drehzahl bei etwa 10° . Im Gegensatz zu den Versuchen bei der niedrigsten Schlagfrequenz von 25 Hz unterschieden sich die Motordrehzahlen bei 50 Hz nur geringfügig: Die Motoransteuerung mit $\beta = 0^\circ$ erreichte die niedrigste Drehzahl bei etwa 135° , während die Motoransteuerung mit

$\beta = 180^\circ$ die niedrigste Geschwindigkeit bei etwa 180° erzeugte. Bei beiden Ansteuerungen war die Drehzahl bei einem Kurbelwinkel von 0° am höchsten.

6.2.2 Unabhängige Einstellung der Einzelschlagenergie durch CIID

Um die unabhängige Einstellung der Einzelschlagenergie durch die Motoransteuerung *CIID* zu analysieren, wurden die Werte Einzelschlagenergie, Schlagfrequenz und Motorstrom gemessen. Diese Werte, gemessen bei drei verschiedenen Schlagfrequenzen und sechs verschiedenen Motoransteuerungen, sind in Tabelle 6.2 aufgeführt.

Tabelle 6.2: Anzahl der Schläge, Einzelschlagenergien, Schlagfrequenzen und Motorströme der ausgewerteten Zeitbereiche für drei verschiedene Schlagfrequenzen. Jeweils eine konstante und fünf Motoransteuerungen mit *CIID* wurden untersucht

Schlagfrequenz 25 Hz						
Motoransteuerung	Konstant	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>
Beschleunigungswinkel β in °	-	0	45	90	135	180
Anzahl der Schläge N	123	121	121	120	121	120
Mittlere Einzelschlagenergie in J	0,59	0,46	0,38	0,45	0,61	0,70
SD Einzelschlagenergie in J	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02
Mittlere Schlagfrequenz in Hz	24,60	24,12	24,13	24,12	24,05	23,91
SD Schlagfrequenz in Hz	0,003	0,25	0,23	0,06	0,04	0,14
Mittlerer Motorstrom in A	3,24	3,09	3,04	2,99	3,12	3,17
SD Motorstrom in A	0,09	1,43	1,49	1,33	1,26	1,07

Schlagfrequenz 37,5 Hz						
Motoransteuerung	Konstant	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>
Beschleunigungswinkel β in °	-	0	45	90	135	180
Anzahl der Schläge N	184	181	181	182	181	181
Mittlere Einzelschlagenergie in J	1,65	1,51	1,43	1,42	1,60	1,75
SD Einzelschlagenergie in J	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
Mittlere Schlagfrequenz in Hz	36,92	36,22	36,28	36,31	36,23	36,15
SD Schlagfrequenz in Hz	0,05	0,20	0,15	0,12	0,15	0,23
Mittlerer Motorstrom in A	6,98	6,69	6,73	6,97	7,12	7,22
SD Motorstrom in A	0,46	2,83	3,01	2,80	2,58	2,43

Schlagfrequenz 50 Hz						
Motoransteuerung	Konstant	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>	<i>CIID</i>
Beschleunigungswinkel β in °	-	0	45	90	135	180
Anzahl der Schläge N	250	247	247	245	245	244
Mittlere Einzelschlagenergie in J	2,95	2,67	3,20	3,29	3,40	3,55
SD Einzelschlagenergie in J	0,06	0,09	0,11	0,11	0,12	0,12
Mittlere Schlagfrequenz in Hz	49,99	49,36	49,25	49,15	48,99	48,83
SD Schlagfrequenz in Hz	0,10	0,24	0,21	0,23	0,26	0,28
Mittlerer Motorstrom in A	14,22	13,82	14,20	14,14	14,22	14,20
SD Motorstrom in A	0,30	2,66	3,17	3,24	3,30	3,40

Die Werte der erfassten Schlagfrequenz in Zeitbereichen mit *CIID* lagen leicht unter den Werten der Schlagfrequenz in Zeitbereichen mit einer konstanten Motoransteuerung. Obwohl die Werte der Schlagfrequenz immer geringer waren, ergaben sich für Zeitbereiche mit zyklischer Motoransteuerung höhere und auch niedrigere Einzelschlagenergien im Vergleich zu einer konstanten

Motoransteuerung. Ob das Niveau höher oder niedriger war, hing von dem Beschleunigungswinkel β ab. Die Standardabweichung der Einzelschlagenergie und des Motorstroms lag für alle zyklischen Motoransteuerungen über dem Niveau bei einer konstanten Motoransteuerung.

Die verschiedenen Motoransteuerungen wurden, wie in Abbildung 6.7 erläutert, bei konstant eingestellter Schlagfrequenz in einem kontinuierlichen Versuch nach dem Messverfahren EPTA 05/2009 „Messung der Einzelschlagenergie von Bohr- und Meißelhämmern“ untersucht (Nalbach, 2009).

In Abbildung 6.11 sind die gemessenen Einzelschlagenergien und Schlagfrequenzen für die eingestellte Schlagfrequenz 25 Hz aufgetragen. Zum Start des Versuches bei null Sekunden wird die konstante Solldrehzahl vorgegeben, welche einer Schlagfrequenz von 25 Hz entspricht. Die Schlagfrequenz (schwarz) und die Einzelschlagenergie (grün) steigen zum Start an. Nach wenigen Sekunden stellt sich ein konstanter Betriebspunkt des elektropneumatischen Schlagwerks mit konstanter Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie ein. Nach zehn Sekunden Versuchsdauer wechselt die konstante Motoransteuerung zu *CIID* mit dem Beschleunigungswinkel $\beta = 0^\circ$. Es ist hierbei zu erkennen, dass die einzelnen Punkte der Einzelschlagenergie ein anderes Niveau erreichen. Es ist grafisch zu erkennen, dass sich die Schlagfrequenz ebenfalls leicht ändert. Nach weiteren zehn Sekunden, bei der Versuchsdauer 20 Sekunden, ändert sich bei *CIID* der Beschleunigungswinkel auf 45° . Hier ist zu erkennen, dass sich das Niveau der Einzelschlagenergie ändert. Alle weiteren zehn Sekunden Versuchsdauer ändert sich nun der Beschleunigungswinkel um weitere 45° . Da es einige Sekunden dauern kann, bis sich ein konstanter Betriebspunkt einstellt, werden nur die letzten 5 Sekunden jeder Motoransteuerung bezüglich der Einzelschlagenergie oder Schlagfrequenz ausgewertet. Der berechnete Mittelwert und die Standardabweichung sind für jeden Bereich angegeben. Ein nicht konstanter Betriebspunkt ist beispielsweise bei der Versuchszeit 51 s zu erkennen, da sich hier die Einzelschlagenergie und Schlagfrequenz ändern.

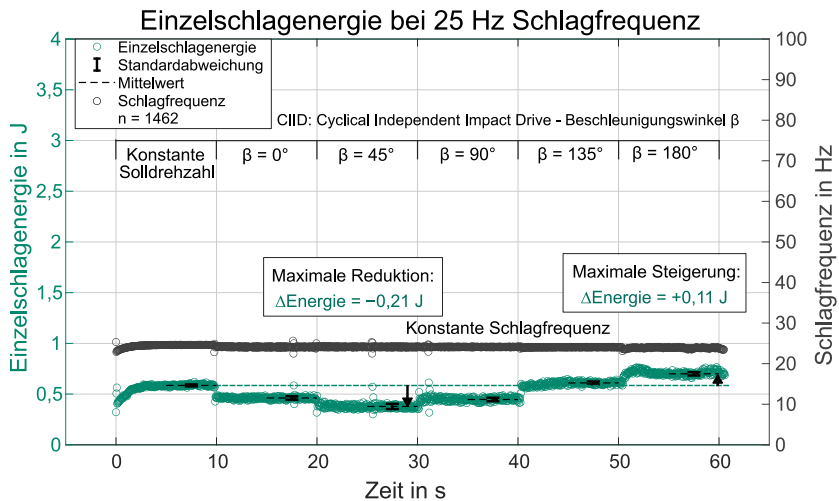


Abbildung 6.11: Variation der Einzel­schlagenergie bei einer konstanten Schlagfrequenz von 25 Hz durch die zyklische Motoransteuerung *CIID*. In 60 Sekunden Versuchsdauer wurde die Motoransteuerung alle zehn Sekunden geändert. (Zimprich et al., 2026)

Der Effekt der zyklischen Motoransteuerung *CIID* wurde auf die Einzel­schlagenergie statistisch ausgewertet. Für die sechs ausgewerteten Zeitfenster mit unterschiedlicher Motoransteuerung zeigte der Levene-Test eine Varianzinhomogenität an ($F(5, 720) = 4,859; p < ,001$). Die Welch-ANOVA zeigte einen signifikanten Unterschied der Einzel­schlagenergie an ($F(5, 330,572) = 4938,935, p < ,001$). Sowohl der Bonferroni als auch der Games-Howell Post-hoc-Test zeigten signifikante Unterschiede der Einzel­schlagenergie zwischen allen Motoransteuerungen an ($p < ,001$). Die höchste Variation der Einzel­schlagenergie wurde mit einer Effektstärke von 0,32 J zwischen der Motoransteuerung $\beta = 45^\circ$ und der Motoransteuerung mit $\beta = 180^\circ$ erzielt. Gegenüber der Referenz einer konstant vorgegebenen Solldrehzahl betrug die maximale mittlere Steigerung der Einzel­schlagenergie 0,11 J, während die maximale mittlere Reduktion -0,21 J betrug.

Auch für die eingestellte Schlagfrequenz 37,5 Hz wurde der Effekt auf die Einzel­schlagenergie statistisch ausgewertet. Die dazugehörigen Werte sind über den Zeitbereich in Abbildung 6.12 abgebildet. Der Levene-Test zeigte wieder eine Varianzinhomogenität der Einzel­schlagenergie an ($F(5, 1084) = 3,219; p = ,007$).

Die Welch-ANOVA zeigte einen signifikanten Unterschied der Einzelschlagenergie für verschiedene Motoransteuerungen an ($F(5, 503,239) = 1938,208; p < ,001$). Der Bonferroni wie auch der Games-Howell Post-hoc-Test zeigten signifikante Unterschiede der Einzelschlagenergie zwischen fast allen Motoransteuerungen an ($p < ,001$). Nur zwischen der Ansteuerung mit $\beta = 45^\circ$ und $\beta = 90^\circ$ konnte kein signifikanter Effekt nachgewiesen werden (Bonferroni: $p = ,058$, Games-Howell: $p = 0,054$). Der höchste Unterschied der Einzelschlagenergie lag mit $0,33 \text{ J}$ zwischen der Motoransteuerung mit $\beta = 90^\circ$ und $\beta = 180^\circ$. Die größte mittlere Steigerung gegenüber der Referenz einer konstanten Solldrehzahl lag bei $0,10 \text{ J}$, die maximale mittlere Reduktion bei $-0,21 \text{ J}$.

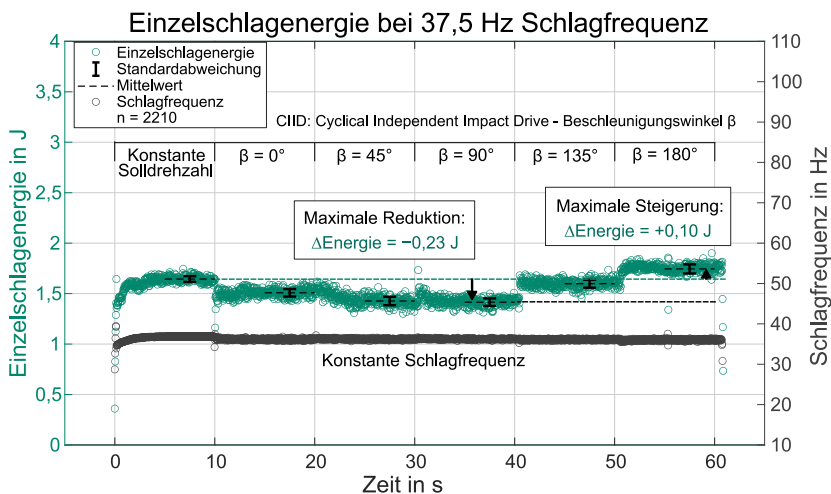


Abbildung 6.12: Variation der Einzelschlagenergie bei einer konstanten Schlagfrequenz von 37,5 Hz durch die zyklische Motoransteuerung *CIID*. In 60 Sekunden Versuchsdauer wurde die Motoransteuerung alle zehn Sekunden geändert. (Zimprich et al., 2026)

Für den Versuch mit der Sollschlagfrequenz 50 Hz sind die gemessenen Werte der Einzelanschlagenergie und Schlagfrequenz im Zeitbereich in Abbildung 6.13 abgebildet. Wie auch in den Versuchen mit 25 Hz und 37,5 Hz Schlagfrequenz zeigte der Levene-Test eine Varianzhomogenität der Einzelanschlagenergie an ($F(5, 1472) = 21,560; p < ,001$). Die Welch-ANOVA zeigte einen signifikanten Effekt der Einzelanschlagenergie zwischen den Motoransteuerungen an ($F(5, 673,629) = 2638,764; p < ,001$). Sowohl der Bonferroni als auch der Games-Howell Post-hoc-

Test zeigten signifikante Effekte der Einzelschlagenergie zwischen allen sechs Motoransteuerungen ($p < ,001$). Der höchste Unterschied zwischen zwei Motoransteuerungen lag mit $0,88 \text{ J}$ zwischen dem Beschleunigungswinkel $\beta = 0^\circ$ und $\beta = 180^\circ$. Die größte mittlere Steigerung gegenüber einer konstanten Ansteuerung betrug $0,59 \text{ J}$, die maximale mittlere Reduktion $-0,28 \text{ J}$. Prozentual entspricht dies einer Steigerung von 20% gegenüber der mittleren Einzelschlagenergie von $2,95 \text{ J}$ bei einer konstanten Solldrehzahl.

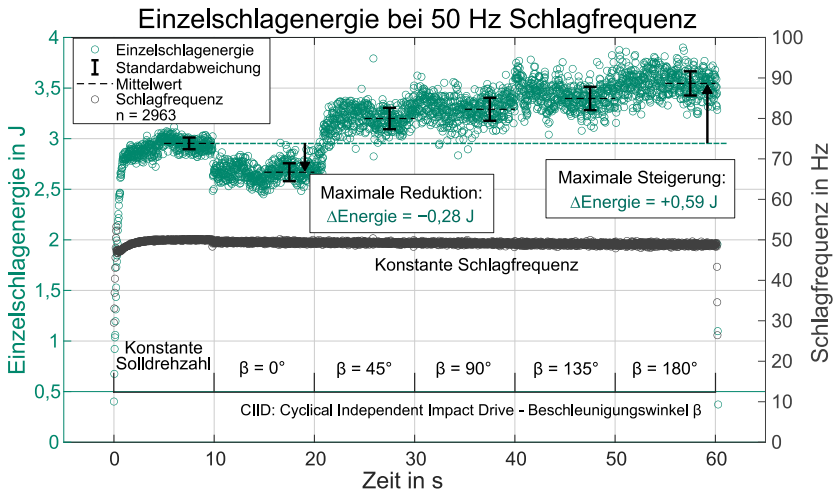


Abbildung 6.13: Variation der Einzelschlagenergie bei einer konstanten Schlagfrequenz von 50 Hz durch die zyklische Motoransteuerung *CIID*. In 60 Sekunden Versuchsdauer wurde die Motoransteuerung alle zehn Sekunden geändert. (Zimprich et al., 2026)

6.2.3 Effekt von CIID auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission

Der Effekt der zyklischen Motoransteuerung *CIID* auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission wurde in einer automatisierten Bohrstudie untersucht. Hierfür wurde die Schlagfrequenz konstant eingestellt, wohingegen die Einzelschlagenergie als Faktor unabhängig über die Motoransteuerung verändert wurde. Analog zu der **Forschungsfrage 1** wurde die Bohrgeschwindigkeit über die ROP und die Vibrationsemission über den a_{hv} -Wert bewertet.

Die Einzelschlagenergien der drei Faktorstufen der Einzelschlagenergie wurden mit dem Verfahren EPTA 05/2009 bestimmt. Die Faktorstufe „geringe Einzelschlagenergie“ hatte einen Wert von 0,36 J. Dies wurde mit der zyklischen Ansteuerung *CIID* und einem Beschleunigungswinkel β von 30° erreicht. Mit dem diesem Winkel konnte die geringste Einzelschlagenergie bei einer Schlagfrequenz von 25 Hz erreicht werden. Die Faktorstufe „mittlere Einzelschlagenergie“ hatte einen Wert von 0,64 J und wurde durch eine konstante Sollzahl eingestellt. „Hohe Einzelschlagenergie“ als Faktorstufe hatte einen Wert von 0,85 J und wurde mit einem Beschleunigungswinkel β von 220° eingestellt. Die drei untersuchten Motoransteuerungen hatten somit alle eine Schlagfrequenz von 25 Hz, aber unterschiedliche Einzelschlagenergien. In Abbildung 6.14 sind die ROP- (grün) und a_{hv} -Werte (schwarz) für die drei Faktorstufen abgebildet. Die Faktorstufen sind von links nach rechts mit steigender Einzelschlagenergie sortiert.

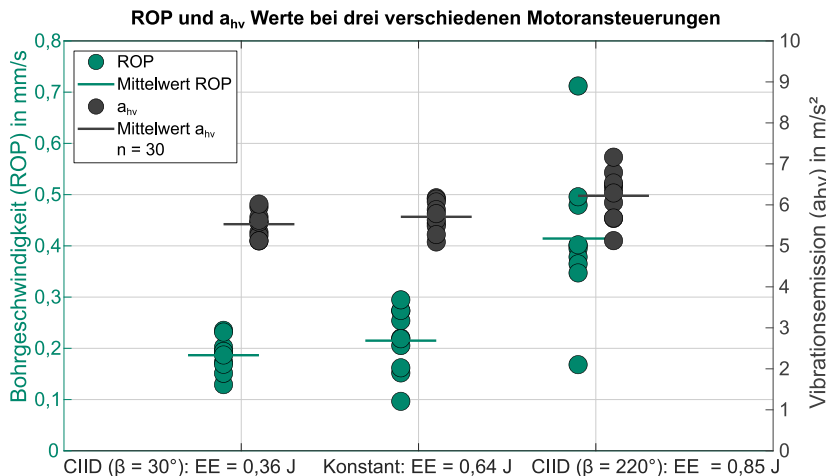


Abbildung 6.14: Gemessene ROP- (grün) und a_{hv} -Werte (schwarz) der automatisierten Bohrstudie bei drei verschiedenen Motoransteuerungen und einer Schlagfrequenz von 25 Hz. Die zyklische Motoransteuerung auf der rechten Seite hatte die höchsten ROP- und a_{hv} -Werte. (Zimprich et al., 2026)

Die drei Motoransteuerungen in Abbildung 6.14 sind von niedriger (links) bis hoher (rechts) Einzelschlagenergie für eine Schlagfrequenz von 25 Hz sortiert. Gemittelt wurden für die zyklische Motoransteuerung mit der Faktorstufe der geringsten Einzelschlagenergie die niedrigsten ROP (Mittelwert: 0,19 mm/s; SD: 0,03 mm/s)

und a_{hv} -Werte (Mittelwert: 5,53 m/s²; SD: 0,32 m/s²) erfasst. Gemittelt wurden die höchsten ROP (Mittelwert: 0,41 mm/s; SD: 0,14 mm/s) und a_{hv} -Werte (Mittelwert: 6,22 m/s²; SD: 0,60 m/s²) für die Faktorstufe mit der höchsten Einzelschlagenergie erfasst. Die gemittelten ROP (Mittelwert: 0,21 mm/s; SD: 0,06 mm/s) und a_{hv} -Werte (Mittelwert: 5,71 m/s²; SD: 0,37 m/s²) der Ansteuerung mit einer konstanten Solldrehzahl lagen zwischen den Werten der Ansteuerung *CIID*. Um basierend auf diesen Werten belastbare Aussagen treffen zu können, wurden die Ergebnisse statistisch analysiert.

Jede Faktorstufe der ROP wurde zur Untersuchung der Normalverteilungen mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft. Für die ROP ist der Shapiro-Wilk-Test in keiner der drei Faktorstufen signifikant. Es kann daher von einer Normalverteilung in jeder Faktorstufe ausgegangen werden. Für die drei Faktorstufen ergab der Levene-Test keine signifikante Verletzung der Varianzhomogenität ($F(2, 27) = 2,884$; $p = ,076$). Die Bedingungen zur Untersuchung der ROP in dieser Studie mit der mehrfaktoriellen Varianzanalyse sind somit für die ROP erfüllt. Die mehrfaktorielle Varianzanalyse ergab einen signifikanten Unterschied in der ROP zwischen den drei untersuchten Faktorstufen ($F(2, 27) = 19,736$; $p < ,001$). Der Bonferroni-Post-hoc-Test zeigt, dass sich die zyklische Motoransteuerung mit der höchsten Einzelschlagenergie (*CIID*: $\beta = 220^\circ$) signifikant von den anderen beiden Motoransteuerungen unterscheidet ($p < ,001$). Zwischen den beiden Motoransteuerungen mit geringer (*CIID*: $\beta = 30^\circ$) und mittlerer Einzelschlagenergie (konstante Solldrehzahl) wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt.

Die in dieser Studie gemessenen a_{hv} -Werte waren niedriger als die Herstellerangaben des nicht modifizierten Bohrhammers Bosch GBH 4-32. Die Herstellerangaben für den a_{hv} -Wert betragen 12,0 m/s², mit einer Unsicherheit K von 1,5 m/s². Für die a_{hv} -Werte gab der Shapiro-Wilk-Test keine Hinweise auf eine nicht normale Verteilung. Auch der Levene-Test zeigte keine signifikante Verletzung der Varianzhomogenität an ($F(2, 27) = 2,138$; $p = ,137$). Die mehrfaktorielle Varianzanalyse ergab einen signifikanten Unterschied der a_{hv} -Werte zwischen den drei Faktorstufen ($F(2, 27) = 6,548$; $p = ,005$). Der Bonferroni-Post-hoc-Test zeigte wiederum, dass nur die zyklische Motoransteuerung mit der höchsten Einzelschlagenergie (*CIID*: $\beta = 220^\circ$) signifikant höhere a_{hv} -Werte im Vergleich zu den zwei weiteren Faktorstufen aufweist. Zwischen den beiden Motoransteuerungen mit geringer (*CIID*: $\beta = 30^\circ$) und mittlerer Einzelschlagenergie (konstante Solldrehzahl) wurde kein signifikanter Unterschied der a_{hv} -Werte nachgewiesen.

6.3 Diskussion

Im ersten Unterkapitel wird der Effekt der zyklischen Motoransteuerung *CIID* auf die resultierende Motordrehzahl diskutiert. Diese Motoransteuerung soll die Korrelation zwischen der Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie auflösen. Um dies bewerten zu können, muss jedoch zuerst der Effekt einer zyklisch eingestellten Solldrehzahl auf die resultierende Drehzahl evaluiert werden. Im zweiten Unterkapitel wird daraufhin die unabhängige Einstellung der Einzelschlagenergie von der Schlagfrequenz diskutiert. Das dritte Unterkapitel beleuchtet den Effekt einer mit *CIID* unabhängig eingestellten Einzelschlagenergie im Bohrprozess auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission.

6.3.1 Einfluss von *CIID* auf die Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen

Die Ergebnisse zeigen, dass die zyklische Motoransteuerung *CIID* einen zyklischen Effekt auf die Motordrehzahl hat. Durch Auftragen der Motordrehzahl über den Kurbelwinkel α konnte dies für verschiedene Schlagfrequenzen und Beschleunigungswinkel β bewertet werden.

Es ist in Abbildung 6.10 zu erkennen, dass der Verlauf der Motordrehzahl selbst bei der Vorgabe einer konstanten Solldrehzahl eine zyklische Charakteristik besitzt. Diese Charakteristik resultiert aus dem zyklischen Lastmoment, welches auf den Motor wirkt. Es resultiert aus der Kinematik des Pleuels und aus dem zyklischen Druck der Luftfeder. Dieser zyklische Verlauf der Motordrehzahl passt daher zu dem zyklisch wirkenden Lastmoment, wie von Riederer (1985) beschrieben.

Mit der zyklischen Vorgabe der Solldrehzahl durch die Motoransteuerung *CIID* konnte die Charakteristik des Schlagwerkes verändert werden. Die Kurbelwinkel der maximalen oder minimalen Drehzahl verschoben sich hierbei. Neben dem Beschleunigungswinkel β waren die Positionen der maximalen oder minimalen Drehzahl abhängig von der Schlagfrequenz.

Für die Schlagfrequenz von 25 Hz war der Effekt auf die Motordrehzahl am deutlichsten zu erkennen. Bei der Schlagfrequenz von 50 Hz änderte sich die Motordrehzahl über den Kurbelwinkel nur geringfügig. Dieses Verhalten kann durch zwei Punkte erklärt werden. Zum einen steigt die kinetische Energie von Motor, Pleuel und Kurbel mit steigender Drehzahl quadratisch an. Diese kinetische Energie wirkt der Änderung der Motordrehzahl entgegen. Zum anderen werden die einzelnen Phasen der niedrigen oder hohen Solldrehzahl mit steigender Schlagfrequenz zeitlich kürzer. Die Phasenlänge wird durch den Kurbelwinkel

bestimmt. Jede Phase entspricht einem Kurbelwinkel von 180° . Mit steigender Motordrehzahl wird der Winkel von 180° schneller durchlaufen. Durch diese kürzere Zeit hat der Motorregler weniger Zeit, auf die Änderung der Drehzahl zu reagieren. Diese beiden Punkte führen dazu, dass die Motordrehzahl bei niedrigen Schlagfrequenzen stärker zyklisch beeinflusst wird als bei hohen Schlagfrequenzen.

Die Motordrehzahl stieg in den Versuchen nicht direkt mit der Vorgabe einer hohen Solldrehzahl an. So stieg die Drehzahl bei der Vorgabe einer hohen Solldrehzahl mit dem Beschleunigungswinkels $\beta = 0^\circ$ nicht direkt an, sondern erst verzögert zwischen 60° und 120° . Zum einen kann dies auf eine Totzeit der Regelstrecke zurückzuführen sein. Die Regelung im Motor-Controller reagiert verzögert auf die Änderung der Solldrehzahl durch *CIID*. Zum anderen kann die Drehzahl nur ansteigen, wenn das Motormoment größer ist als das Lastmoment. Wenn bei Erreichen des Beschleunigungswinkels das Lastmoment aus der Kraft der Luftfeder größer ist als das Motormoment, so sinkt die Drehzahl weiter ab, auch wenn eine hohe Solldrehzahl vorgegeben ist. Diese Erklärung passt zu den Erkenntnissen von Schäfer (2018) und Todorov et al. (2010). Diese ermittelten Verläufe der Luftfederkraft. Die hier ermittelten kurzzeitig auftretenden Maximalkräfte der Luftfeder übersteigend das maximale Motormoment der Untersuchungsumgebung *DualDrive*.

Die Streuung der Motordrehzahl stieg mit einer zyklisch vorgegebenen Solldrehzahl. Jeder Sprung der Solldrehzahl stellt eine Anregung des Systems dar. Da dies zweimal pro Kurbelumdrehung über *CIID* passiert (vgl. Abbildung 6.3), stellt *CIID* für den Antriebsstrang eine zusätzliche Anregung dar. Trotzdem konnte mit den gewählten Regelparametern ein stabiler Betriebspunkt gefunden werden. Mit einer trägeren Regelung könnte die Streuung der Motordrehzahl reduziert werden, jedoch würde auch der Effekt auf die zyklische Charakteristik vermutlich kleiner ausfallen. Um dies weiter untersuchen zu können, ist jedoch eine höherfrequente Abtastrate der Motordrehzahl notwendig. Durch die weitere Optimierung der Regelparameter für die Motoransteuerung *CIID* könnte die Streuung der Motordrehzahl weiter reduziert oder der zyklische Effekt auf die Motordrehzahl vergrößert werden.

Bei den Versuchen wurde in den Zeitbereichen mit der Motoransteuerung *CIID* eine geringere mittlere Motordrehzahl und damit eine geringere Schlagfrequenz gemessen als in den Zeitbereichen mit konstanter Solldrehzahl (vgl. Tabelle 6.2). Diese Abweichung der mittleren Schlagfrequenz resultiert aus der unterschiedlichen Motoransteuerung. In Zeitbereichen konstanter Motoransteuerung wird die vorgegebene Schlagfrequenz nahezu erreicht. Der I-Anteil des Motorreglers sorgt dafür, dass keine bleibende Regelabweichung auftritt. In Zeitbereichen mit der Motoransteuerung *CIID* resultiert die Schlagfrequenz aus den fest vorgegebenen

niedrigen und hohen Solldrehzahlen. Mit der aktuellen Umsetzung der Motoransteuerung *CIID* kann somit nicht auf eine Schlagfrequenz geregelt werden. Durch Vorgabe einer niedrigen und einer hohen Solldrehzahl kann eine Schlagfrequenz nur angesteuert werden. Die Werte der niedrigen und hohen Solldrehzahlen müssen davor empirisch ermittelt werden. *CIID* entspricht somit einer Steuerung, nicht aber einer Regelung. Dies erklärt die größere Abweichung der Schlagfrequenz gegenüber einer konstant vorgegebenen Solldrehzahl. Um die Abweichung der Schlagfrequenz auszugleichen, müsste die Motoransteuerung *CIID* den Wert der hohen Solldrehzahl basierend auf der mittleren Abweichung der Drehzahl anpassen können.

Die Schlagfrequenz konnte in den Versuchen somit nicht komplett konstant gehalten werden. Das Ziel der Motoransteuerung *CIID* ist es, die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz einzustellen. Für die **Untersforschungsfrage 2.2** muss die geringe Abweichung der Schlagfrequenz zwischen den Motoransteuerungen zusammen mit den Effekten auf die Einzelschlagenergie diskutiert werden. Es lässt sich aber festhalten, dass die zyklische Motoransteuerung *CIID* die Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen zyklisch beeinflussen kann. Für die **Untersforschungsfrage 2.1** lässt sich aber zusammenfassend festhalten, dass *CIID* einen einstellbaren Effekt auf den zyklischen Verlauf der Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen hat. Dies wird erreicht durch verschiedene Beschleunigungswinkel β .

6.3.2 Unabhängige Einstellung der Einzelschlagenergie durch *CIID*

In der Tabelle 6.2 ist zu erkennen, dass die gemessene Schlagfrequenz in Zeitbereichen der Motoransteuerung *CIID* immer unter dem Wert der Schlagfrequenz von Zeitbereichen einer konstanten Motoransteuerung lag. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Einzelschlagenergie mit *CIID* im Vergleich zu einer konstanten Solldrehzahl höhere und niedrigere Werte erreichen konnte. Die Werte der Einzelschlagenergie sind abhängig vom Beschleunigungswinkel β .

Die Abweichung der Schlagfrequenz durch *CIID* war maximal bei 50 Hz. Diese prozentuale Abweichung betrug aber nur 1,09 % zwischen den Einstellungen $\beta = 0^\circ$ (49,36 Hz) und $\beta = 180^\circ$ (48,83 Hz). Diese Abweichung ist sehr viel kleiner im Vergleich zu der prozentualen Änderung der Einzelschlagenergie von bis zu 32,96 % zwischen den Einstellungen $\beta = 0^\circ$ (49,36 Hz) und $\beta = 180^\circ$ (48,83 Hz). Es lässt sich daher feststellen, dass mit der neuen Motoransteuerung *CIID* die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz eingestellt werden kann. Gegenüber bisherigen Untersuchungen stellt dies eine Neuheit dar.

Vergleicht man *CIID* mit Studien aus dem Stand der Forschung, so stellt man fest, dass die erreichte Steigerung der Einzelschlagenergie im anwendungsrelevanten Bereich liegt. Todorov et al. (2010) veränderten Parameter im Schlagwerk (z. B. Masse des Schlagbolzens, Gewicht des Schlagbolzens und Durchmesser der Luffeder) zur Optimierung der Einzelschlagenergie. Die daraus resultierende Steigerung der Einzelschlagenergie betrug weniger als 10 % (Todorov et al., 2010). *CIID* konnte eine vergleichbare oder sogar höhere Steigerung der Einzelschlagenergie erreichen. Im Vergleich zu einer konstanten Motoransteuerung konnte die Einzelschlagenergie bei verschiedenen Schlagfrequenzen um 16,5 % bis 20,0 % gesteigert werden. Die durch *CIID* ermöglichte Steigerung der Einzelschlagenergie kann daher als relevant für die Anwendung Hammerbohren angesehen werden.

Für verschiedene Anwendungen beim Hammerbohren sind verschiedene Faktoreinstellungen von Einzelschlagenergie und Schlagfrequenz optimal. Diese konnten bisher jedoch nicht unabhängig voneinander eingestellt werden. Bohrer mit geringem Bohrdurchmesser erreichen die höchste Bohrgeschwindigkeit bei hoher Schlagfrequenz und mittlerer Einzelschlagenergie. Im Gegensatz hierzu erreichen Bohrer mit großem Bohrdurchmesser die höchste Bohrgeschwindigkeit bei geringerer Schlagfrequenz und hoher Einzelschlagenergie (Vonnemann, 1977; Wiedner, 2008). *CIID* ermöglicht es nun bei verschiedenen Anwendungen im Hammerbohren optimale Einstellungen von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie einzustellen.

Weiche Materialien, wie beispielsweise Ziegelsteine, müssen beim Hammerbohren mit geringerer Einzelschlagenergie gebohrt werden, um eine hohe Bohrlochqualität ohne Ausbrüche zu erreichen. Die Einzelschlagenergie wird bei Bohrhämmern hierfür durch eine Reduktion der Schlagfrequenz abgesenkt (Würsch et al., 2004). Die notwendige Absenkung der Schlagfrequenz reduziert aber auch die Bohrgeschwindigkeit, da weniger Schläge pro Sekunde zum Bohrfortschritt beitragen können. Mit *CIID* kann die Einzelschlagenergie jetzt abgesenkt werden, ohne hierfür die Schlagfrequenz absenken zu müssen. *CIID* kann daher beim Bohren weicher Materialien die Produktivität erhöhen.

Der erzielte Effekt auf die Einzelschlagenergie durch *CIID* war bei der Schlagfrequenz 50 Hz am größten (vgl. Abbildung 6.13). Im Gegensatz hierzu änderte sich bei dieser Schlagfrequenz die resultierende Motordrehzahl durch verschiedene Einstellung mit *CIID* am wenigsten (vgl. Abbildung 6.10). Die dynamische Abstimmung im Schlagwerk und damit die Einzelschlagenergie hängt von dem Verlauf der Kraft der Luffeder F ab. Diese wirkt auf den Flugkolben. Die Luffeder ist eine progressive Feder. Eine hohe Kraft F wirkt auf den Flugkolben,

wenn die Luftfeder stark komprimiert ist (Yan et al., 2016). Kleine Änderungen der Motordrehzahl können daher bei hoher Kompression einen großen Effekt auf die Kraft F haben. Bei hohen Schlagfrequenzen führt dies zu einem großen Effekt auf die Einzelschlagenergie, da hier die Luftfeder am stärksten komprimiert wird.

Bei *CIID* ist der Effekt des Beschleunigungswinkels β in Wechselwirkung mit der Schlagfrequenz. In den Versuchen wurde eine minimale Einzelschlagenergie daher auch bei verschiedenen Beschleunigungswinkeln β erreicht (vgl. $\beta=90^\circ$ bei 37,5 Hz in Abbildung 6.12 zu $\beta = 0^\circ$ bei 50 Hz in Abbildung 6.13). Um die Einzelschlagenergie aber gezielt beeinflussen zu können, muss der Effekt des Beschleunigungswinkels β für alle relevanten Schlagfrequenzen experimentell ermittelt werden. Der Effekt von *CIID* und dem Beschleunigungswinkel β auf die Einzelschlagenergie ist ebenfalls abhängig vom verwendeten Schlagwerk und der Schlagfrequenz. Zur Anwendung von *CIID* bei anderen Schlagwerken muss der Effekt auf die Einzelschlagenergie daher für die verschiedenen Schlagfrequenzen und Beschleunigungswinkel β experimentell ermittelt werden.

Wie im vorherigen Unterkapitel erklärt, ist eine Randbedingung für *CIID*, dass die Motorregelung stabil bleiben muss. Durch eine optimierte Motorregelung könnte der Effekt von *CIID* auf die Einzelschlagenergie weiter gesteigert werden. Eine größere zyklische Änderung der Motordrehzahl bei weiterhin stabiler Motorregelung würde größere Effekte auf die Einzelschlagenergie ermöglichen.

Eine optimierte Motorregelung könnte durch eine simulative Untersuchung des Schlagwerks erforscht werden. Hier ist insbesondere die Bewegung des Flugkolbens interessant. Der Flugkolben ist ein Freiheitsgrad im Schlagwerk und stellt damit ein großer Unsicherheitsfaktor dar. In der Simulation kann diese Bewegung erfasst werden. Dies würde es erlauben, optimale Regelparameter für verschiedene Schlagfrequenzen simulativ zu identifizieren. Mit diesen optimalen Regelparametern könnte der Effekt auf die Einzelschlagenergie weiter gesteigert werden.

In diesem Unterkapitel konnte gezeigt werden, dass sich mit der zyklischen Motoransteuerung *CIID* die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz einstellen lässt. Bei verschiedenen konstanten Schlagfrequenzen konnte die Einzelschlagenergie um bis zu 54 % variiert werden. Darauf aufbauend gilt es zu betrachten, ob die mit *CIID* unabhängig eingestellte Einzelschlagenergie einen Effekt auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission beim Hammerbohren hat. Für die **Unterforschungsfrage 2.2** lässt sich daher zusammenfassend festhalten, dass *CIID* die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz verändern kann.

6.3.3 Effekt von CIID auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission

In der automatisierten Bohrstudie mit unabhängig eingestellter Einzelschlagenergie konnte gezeigt werden, dass die Bohrgeschwindigkeit, aber auch die Vibrationsemission, bei konstanter Schlagfrequenz beeinflusst werden kann.

Die statistische Analyse zeigte, dass bei 25 Hz Schlagfrequenz die Motoransteuerung *CIID* gegenüber einer konstanten Motoransteuerung zu einer höheren Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission führte. Die Motoransteuerung *CIID* mit dem Beschleunigungswinkel $\beta = 220^\circ$ entspricht auch der höchsten Einzelschlagenergie von 0,85 J in dieser Bohrstudie. Die konstante Motoransteuerung hatte eine Einzelschlagenergie von 0,64 J.

Gegenüber einer konstanten Motoransteuerung konnte für *CIID* mit dem Beschleunigungswinkel $\beta = 30^\circ$ kein signifikanter Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission festgestellt werden. Dies war überraschend, da sich die beiden Ansteuerungen in der Einzelschlagenergie unterschieden (*CIID*: 0,64 J, Konstant: 0,36 J).

Für die Bohrgeschwindigkeit lässt sich dies durch den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Einzelschlagenergie und der Bohrgeschwindigkeit erklären (Franca, 2011; Hecker, 1986). Ein Schwellwert der Einzelschlagenergie ist erforderlich, um den plastischen Anteil in der Penetration und damit einen größeren Bohrfortschritt zu erreichen. Dieser Bereich des Eindringens und Rückpralls wird von Vonnemann (1977) beim Hammerbohren als linear betrachtet. Jedoch ist besonders der Start des Eindringvorgangs nichtlinear. Bleibt die Einzelschlagenergie daher unter einem Schwellwert, so ist das Verhalten nichtlinear (Vonnemann, 1977). Die Werte der Einzelschlagenergie sind mit 0,36 J, 0,64 J und 0,85 J für einen Bohrer des Durchmessers 16 mm als vergleichsweise gering anzusehen. Die Energie der Schläge reicht besonders im Bereich der geringen Einzelschlagenergie nicht aus, um Beton in großer Menge durch Abplatzungen zu Bohrmehl zu zertrümmern. Erst das Überschreiten eines Schwellenwertes zwischen 0,64 J und 0,85 J steigert die Bohrgeschwindigkeit signifikant.

Bei der zyklischen Motoransteuerung *CIID* führte die Faktorstufe der hohen Einzelschlagenergie zu höheren a_{hv} -Werten. Für *CIID* mit geringer Einzelschlagenergie konnte jedoch kein Effekt auf die a_{hv} -Werte gezeigt werden. In dieser Studie korrelierten die a_{hv} -Werte eher mit der ROP. Dieses Verhalten wurde auch von Botti et al. (2020) und Yan et al. (2016) beobachtet. Auch hier gab es einen Anstieg der Vibrationsemission mit steigender Bohrgeschwindigkeit. Dies deutet

darauf hin, dass eine zyklische Motoransteuerung nicht zu einer höheren Vibrationsemission führen muss. Eine gesteigerte Bohrgeschwindigkeit bei gleichbleibender Vibrationsintensität durch *CIID* könnte daher die resultierende Vibrationsexposition auf den Anwender senken und diesen damit vor muskuloskelettalen Erkrankungen und Nervenschäden schützen.

Wie in Kapitel 6.3.1 ausgeführt, hat die Motordrehzahl auch bei konstant vorgegebener Solldrehzahl eine zyklische Charakteristik. Diese resultiert aus der Kraftanregung der Luftfeder auf den Kolben. Die Motordrehzahl sinkt bei einem hohen Lastmoment, resultierend aus einem hohen Druck der Luftfeder. Diese Kraftanregung aus der Luftfeder ist für den Bohrhämmer eine Vibrationsanregung. Durch *CIID* könnte der Verlauf der Motordrehzahl so abgestimmt werden, dass das zyklische Absinken durch ein zyklisches Motormoment minimiert wird. Mit dieser abgestimmten zyklischen Anregung aus dem Motor wäre es daher denkbar, dass sich die zwei Anregungen teilweise aufheben und dies damit zu einer geringeren Vibrationsemission führen könnten. Hierbei muss jedoch darauf geachtet werden, dass mit der dynamischen Abstimmung des Schlagwerks weiterhin hohe Einzelschlagenergien erreicht werden. Die Reduktion der Vibrationsemission durch eine zyklische Motoransteuerung lässt sich daher aus der Bohrstudie als vielversprechende Forschungsrichtung identifizieren.

Die Schlagfrequenz von 25 Hz wurde als stabilster Betriebspunkt des Schlagwerks mit der zyklischen Motoransteuerung *CIID* für die Bohrstudie gewählt. Dies reduzierte die Streuung der Versuche, wodurch statistisch belastbare Effekte gewonnen werden konnten. Da die Inhomogenität des Betons zu zusätzlicher Versuchsstreuung führt, wurde darauf geachtet, die Streuung der Einzelschlagenergie so gering wie möglich zu halten. Dies führte zu einem niedrigeren ROP im Vergleich zu anderen Studien zum Hammerbohren (Botti et al., 2020; Uhl, Robens, Gauch, Gwosch et al., 2023). Der Bohrer mit einem Durchmesser von 16 mm führte in Kombination mit dem Beton einer hohen Druckfestigkeitsklasse C50/60 zu einer geringen Bohrgeschwindigkeit bei dieser Schlagfrequenz. Ein kleinerer Bohrdurchmesser oder eine niederfestere Betonklasse, wie z. B. C20/25, würden zu einer höheren Bohrgeschwindigkeit führen (Uhl et al., 2022). Dies oder eine höhere Schlagfrequenz wären eine gängigere Anwendung beim Hammerbohren. Für die **Unterforschungsfrage 2.3** konnte dennoch gezeigt werden, dass eine mit *CIID* eingestellte Einzelschlagenergie bei konstanter Schlagfrequenz einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission hat.

6.4 Einschränkungen der Studie

In dieser Studie wurde die Kombination eines Bohrhammers, eines elektropneumatischen Schlagwerks, eines Bohrers und einer bestimmten Betonklasse untersucht. Um die Übertragbarkeit auf weitere Systeme zu ermöglichen, sollten weitere Untersuchungen der Motoransteuerung *CIID* mit anderen Kombinationen durchgeführt werden. Die präsentierte Studie wurde mit einem Bohrer des Durchmessers 16 mm durchgeführt. Insbesondere Studien mit anderen, insbesondere kleineren, Bohrdurchmessern werden empfohlen, da der Durchmesser des Bohrers einen Einfluss auf die dynamische Abstimmung im Schlagwerk haben kann (Wiedner, 2008). Weitere Studien tragen dazu bei, die Ergebnisse in Bezug auf die Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission für andere Bohrer zu validieren.

In dieser Studie wurde ein automatisierter Bohrprüfstand genutzt, um die Löcher mit einer konstanten Vorschubkraft zu bohren. Dies gewährleistet einen stabilen Betriebspunkt des Schlagwerks und damit auch einen stabilen Bohrprozess (DIN EN ISO 28927-10:2011; Nalbach, 2009). Die Effekte der Motoransteuerung *CIID* auf die Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission sind daher für eine konstante Vorschubkraft gültig. Effekte einer stark schwankenden Vorschubkraft auf *CIID* wurden in dieser Studie nicht untersucht. So können Anwender Andruckkräfte nicht gezielt einstellen, wodurch Vorschubkraft streuen (Uhl et al., 2019). Zusätzlich können Querkräfte beim Hammerbohren auftreten, wodurch das Lastmoment am Bohrer zusätzlich steigen kann (Uhl, 2022). Es wurde noch nicht nachgewiesen, ob mit *CIID* ein stabiler Bohrprozess bei einer hohen Streuung von Vorschub- und Querkraft beim manuellen Bohren mit Anwendern möglich ist.

Die Motoransteuerung *CIID* wurde in dieser Studie in der Untersuchungsumgebung *DualDrive* untersucht. Im Gegensatz zu konventionellen Bohrhämmern hat diese Untersuchungsumgebung einen mechanisch entkoppelten Antriebsstrang und Motoren mit höherer Nennleistung. Hierdurch konnte die Motoransteuerung *CIID* in dieser Studie ohne eine Wechselwirkung zur Rotation des Bohrers untersucht werden. Es wurde daher nicht untersucht, welchen Effekt die Motoransteuerung *CIID* in einem konventionellen Bohrhammer mit mechanisch gekoppeltem Antriebsstrang hat.

CIID beeinflusst das Schlagwerk zyklisch, da das Lastmoment im Schlagwerk einen zyklischen Anteil hat. Auch das Bohrmoment hat einen mit der Schlagfrequenz zyklischen Anteil (Bruchmüller, 2020). Somit erzeugen in konventionellen Bohrhämmern sowohl das Schlagwerk als auch die Bohrrotation ein mit der Schlagfrequenz zyklisches Lastmoment auf den Antriebsmotor. Die Integration von

CIID in einen konventionellen Bohrerhammer mit nur einem Motor wäre daher ein vielversprechender Ansatz und sollte in zukünftigen Studien untersucht werden. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass der Motor eine ausreichend hohe Leistungsreserve hat. Diese wird benötigt, um bei der Motoransteuerung *CIID* in der Phase einer hohen Söldrehzahl den Motor durch hohe Motormomente ausreichend beschleunigen zu können.

6.5 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde untersucht, ob sich mit einer zyklischen Motoransteuerung die Korrelation zwischen der Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie in elektropneumatischen Schlagwerken auflösen lässt. Hierfür wurde die zyklische sowie konstante Motoransteuerung *Cyclical Independent Impact Drive CIID* entwickelt und vorgestellt. Diese soll durch eine zyklische Änderung der Söldrehzahl die Motordrehzahl und damit die Einzelschlagenergie beeinflussen.

Zur Beantwortung der **Unterforschungsfrage 2.1** „Hat die mit der Schlagfrequenz zyklische Motoransteuerung *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* einen Effekt auf den zyklischen Verlauf der Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen?“ wurden die resultierende Motordrehzahl bei verschiedenen Einstellungen mit der Motoransteuerung *CIID* erfasst.

Es zeigte sich, dass die zyklische Motoransteuerung *CIID* auf die Motordrehzahl einen zyklischen Effekt hat. Durch den Beschleunigungswinkel β konnte dieser zyklische Effekt verändert werden. Dies war bei verschiedenen Schlagfrequenzen möglich. Die **Unterforschungsfrage 2.1** lässt sich daher beantworten mit „Die mit der Schlagfrequenz zyklische Motoransteuerung *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* hat auf die resultierende Motordrehzahl bei verschiedenen Schlagfrequenzen einen Effekt auf den zyklischen Verlauf, welcher durch den Beschleunigungswinkel β gezielt verändert werden kann.“

Zur Beantwortung der **Unterforschungsfrage 2.2** „Lässt sich mit der zyklischen Motoransteuerung *CIID* die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz einstellen?“ wurde die Einzelschlagenergie bei verschiedenen Motoransteuerungen mit dem Messverfahren EPTA 05/2009 erfasst.

Es konnte gezeigt werden, dass mit *CIID* bei konstanter Schlagfrequenz die Einzelschlagenergie um bis zu 30 % variiert werden kann. Daher lässt sich die **Unterforschungsfrage 2.2** beantworten mit „Mit der zyklischen Motoransteuerung

CIID lässt sich die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz einstellen“.

Die **Unterforschungsfrage 2.3** „Hat eine mit *CIID* von der Schlagfrequenz unabhängig eingestellte Einzelschlagenergie beim Hammerbohren einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission?“ wurde durch die Durchführung und Auswertung einer automatisierten Bohrstudie bei verschiedenen Motoransteuerungen beantwortet.

Für Hammerbohren bei konstanter Schlagfrequenz und unterschiedlichen Einzelschlagenergien konnte ein Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission nachgewiesen werden. Hierdurch lässt sich die **Unterforschungsfrage 2.3** mit „Eine mit *CIID* von der Schlagfrequenz unabhängig eingestellte Einzelschlagenergie hat einen Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission“ beantworten.

Die Beantwortung der **drei Unterforschungsfragen** erlaubt die Beantwortung der **Forschungsfrage 2** „Lässt sich mit einer konstanten, sowie mit der Schlagfrequenz zyklischen, Motoransteuerung die Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie in elektropneumatischen Schlagwerken auflösen?“. Mit *CIID* konnte die Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz verändert werden. Beim Hammerbohren konnte hierfür ein Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission nachgewiesen werden. Die **Forschungsfrage 2** kann damit beantwortet werden: „Mit der Motoransteuerung *CIID* lässt sich die Korrelation zwischen von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie in elektropneumatischen Schlagwerken auflösen“.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Abschnitt fasst die Kernerkenntnisse zusammen, die durch diese Arbeit erlangt wurden. Darüber hinaus werden zukünftige Forschungsrichtungen aufgezeigt, welche auf dieser Arbeit aufbauen können.

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde untersucht, wie sich die Korrelation von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken allein durch Motoransteuerungen auflösen lässt. Durch die Korrelation, ließen sich diese multikollinearen Faktoren in Untersuchungen nur kombiniert, und damit abhängig voneinander, einstellen. Wie in Abbildung 7.1 gezeigt, lassen sich nun Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie durch geeignete Motoransteuerungen als Faktoren unabhängig einstellen. Diese unabhängige Einstellung erlaubt die Optimierung von Hammerbohren für verschiedenen Anwendungen.

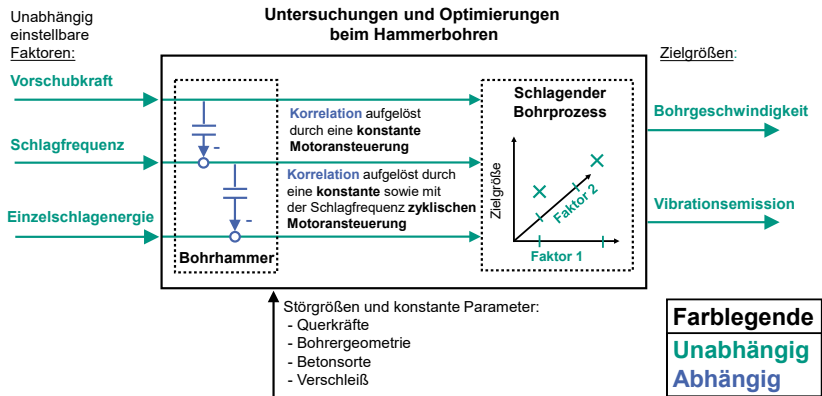


Abbildung 7.1: Blockschaubild für Untersuchungen beim Hammerbohren. Durch konstante sowie zyklische Motoransteuerungen konnte die Korrelation aufgelöst werden. Die eigentlich multikollinearen Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie sind durch Motoransteuerungen nun unabhängig einstellbar.

Die **Hauptforschungsfrage** dieser Arbeit „Lässt sich die Korrelation von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken allein durch Motoransteuerungen auflösen?“ konnte somit beantwortet werden. **Es ist möglich die Korrelation von Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken durch konstante sowie mit der Schlagfrequenz zyklische Motoransteuerungen aufzulösen.** Dies konnte experimentell gezeigt werden. Der zyklische Anteil der Motoransteuerung muss in der Phase einstellbar sein, um darüber gezielt Einfluss auf die dynamische Abstimmung des Schlagwerks nehmen zu können. Die Einzelschlagenergie des elektropneumatischen Schlagwerks wurde erstmalig mit der neuen Motoransteuerung *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* variiert. Die Auflösung der Multikollinearität der Faktoren durch Motoransteuerungen ermöglicht weitere Optimierungen beim Hammerbohren.

Die übergeordnete **Hauptforschungsfrage** dieser Arbeit konnte beantwortet werden durch die Beantwortung der zwei abgeleiteten **Forschungsfragen**:

- **Forschungsfrage 1:** Lässt sich mit einer konstanten Motoransteuerung die Korrelation zwischen der Schlagfrequenz und der Vorschubkraft beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken auflösen?

- **Forschungsfrage 2:** Lässt sich mit einer konstanten, sowie mit der Schlagfrequenz zyklischen, Motoransteuerung die Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie in elektropneumatischen Schlagwerken auflösen?

Um **Forschungsfrage 1** beantworten zu können, wurde der Bohrhammer *DualDrive* entwickelt und als Untersuchungsumgebung genutzt. Dieser Bohrhammer trennt den eigentlich mechanisch gekoppelten Antriebsstrang. Eine Drehzahldrückung, beispielsweise hervorgerufen durch eine steigende Vorschubkraft, wirkt sich daher nicht auf den Motor des Schlagwerks aus und besitzt daher keine Korrelation mit der Schlagfrequenz. Dieser Bohrhammer mit getrenntem Antriebsstrang ermöglicht es, Motoransteuerungen gezielt zu untersuchen. Durch eine konstante Motoransteuerung beider Motoren können die Vorschubkraft und die Schlagfrequenz unabhängig voneinander eingestellt werden. In einer automatisierten Bohrstudie wurden die Faktoren Vorschubkraft und Schlagfrequenz systematisch variiert und dabei erstmalig der jeweilige Effekt auf Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission bestimmt. Durch Messung der resultierenden Motordrehzahlen und auftretenden Vorschubkräften in den Versuchen konnte die unabhängige Einstellung der Vorschubkraft und der Schlagfrequenz bestätigt werden. In der Studie konnte gezeigt werden, dass die Faktoren Vorschubkraft und Schlagfrequenz jeweils einen starken Effekt auf die Zielgrößen haben können.

Dies bedeutet, dass Bohrhammerstudien im Stand der Forschung zum Effekt der Vorschubkraft bisher immer durch eine systemspezifische Korrelation mit der Schlagfrequenz verzerrt sind. Diese Korrelation kann für jede untersuchte Kombination aus Anwenderkräften, Bohrhammer, Bohrer und Untergrund verschieden sein. Teilweise divergierende Erkenntnisse zum Einfluss der Vorschubkraft im Stand der Forschung können hierdurch erklärt werden. Es konnte gezeigt werden, dass sinkende Bohrgeschwindigkeiten bei hohen Vorschubkräften in bisherigen Bohrhammerstudien auf systemspezifische Drehzahldrückungen des verwendeten Bohrhammers zurückzuführen sind. Durch die Drehzahldrückung sinkt die Schlagfrequenz und die Bohrdrehzahl. Daraus wird abgeleitet, dass bei zukünftigen Hammerbohrstudien immer die Schlagfrequenz der untersuchten Betriebspunkte angegeben werden sollte. Hierdurch kann der Einfluss dieses Effektes abgeschätzt werden, wodurch Hammerbohrstudien vergleichbarer werden.

Forschungsfrage 1 konnte somit beantwortet werden. Durch eine konstante Motoransteuerung für elektropneumatische Schlagwerke lässt sich die Korrelation zwischen der Schlagfrequenz und Vorschubkraft auflösen. Schlagfrequenz und Vorschubkraft haben einen starken Effekt auf die Bohrgeschwindigkeit. Die Vorschubkraft hat einen starken Effekt auf die Vibrationsemission, wohingegen die Schlagfrequenz einen schwachen Effekt besitzt. Die unabhängige Einstellung von

Schlagfrequenz und Vorschubkraft beim Hammerbohren durch eine konstante Motoransteuerung eröffnet Optimierungspotential beim Hammerbohren.

Auch zur Beantwortung von **Forschungsfrage 2** wurde die Bohrhammer *DualDrive* genutzt. Durch den mechanisch getrennten Antriebsstrang ist es möglich, zyklische Motoransteuerungen des Schlagwerks ohne Wechselwirkung zur Bohrrotation untersuchen zu können. Um die **Forschungsfrage 2** experimentell untersuchen zu können, wurde die Motoransteuerung *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* entwickelt. Diese verändert die Solldrehzahl des Motors in Abhängigkeit von dem Kurbelwinkel des Schlagwerks. Zusätzlich kann die Phase der Ansteuerung mit dem Steuerwinkel β über den Kurbelwinkel verändert werden. Durch die Messung der resultierenden Motordrehzahl konnte gezeigt werden, dass die zyklische Ansteuerung einen zyklischen Effekt bei verschiedenen Schlagfrequenzen hat. Zur Bestimmung des Effektes auf die Einzelschlagenergie wurden Versuche mit konstanter Schlagfrequenz nach dem Testverfahren „EPTA 05/2009“ durchgeführt. Diese haben gezeigt, dass sich durch die zyklische Motoransteuerung die Einzelschlagenergie auch bei konstanter Schlagfrequenz variieren lässt. *CIID* ermöglichte eine Variation der Einzelschlagenergie um bis zu 54 % gegenüber dem Wert einer konstanten Motoransteuerung. Der Einfluss der zyklischen Motoransteuerung *CIID* beim Hammerbohren wurde in einer automatisierten Bohrstudie untersucht. Analog zu der **Forschungsfrage 1** wurden die Zielgrößen Bohrgeschwindigkeit und Vibrationsemission betrachtet. Es konnte gezeigt werden, dass sich mit erhöhter Einzelschlagenergie durch die zyklische Motoransteuerung *CIID* die Bohrgeschwindigkeit steigern lässt. Die Vibrationsemission stieg nur bei der zyklischen Motoransteuerung *CIID* mit erhöhter Einzelschlagenergie, nicht aber bei der zyklischen Motoransteuerung *CIID* mit reduzierter Einzelschlagenergie. Dies zeigt, dass eine zyklische Ansteuerung nicht zwingend eine zusätzliche Schwingungsanregung darstellt, welche die Vibrationsemission des Bohrhammers steigen lässt.

Somit konnte auch **Forschungsfrage 2** beantwortet werden. Durch eine konstante sowie mit der Schlagfrequenz zyklischen Motoransteuerung lässt sich die Korrelation von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie in elektropneumatischen Schlagwerken auflösen. Die zyklische Ansteuerung verändert die dynamische Abstimmung im Schlagwerk, wodurch sich die Einzelschlagenergie verändert. Mit der Motoransteuerung *Cyclical Independent Impact Drive (CIID)* lässt sich die dynamische Abstimmung, und damit auch die Einzelschlagenergie, über den Steuerwinkel β erstmalig gezielt variieren. Die Variation der Einzelschlagenergie unabhängig von der Schlagfrequenz beim Hammerbohren bietet weiteres Optimierungspotential.

7.2 Ausblick

Die Auflösung von Korrelationen beim Hammerbohren mit elektropneumatischen Schlagwerken und die Methode der zyklischen Motoransteuerung, umgesetzt in dieser Arbeit durch den Bohrhammer *DualDrive* und die Motoransteuerung *CIID*, bietet Potential für weiterführende Arbeiten. Dieses Unterkapitel soll einen Überblick geben, welche weiteren Forschungsarbeiten vielversprechend sind. Diese lassen sich in vier Überkategorien gliedern:

- Die Nutzung des Bohrhammers *DualDrive* für weitere Studien
- Die weitere Optimierung der zyklischen Ansteuerung *CIID*
- Nutzung einer zyklischen Ansteuerung für weitere Power-Tools
- Die anwenderabhängige Anpassung des Betriebspunktes durch *CIID*

Studien mit dem Bohrhammer *DualDrive*

Mit der Bohrhammer *DualDrive* können Faktoren beim Hammerbohren gezielt verändert werden, welche in konventionellen Bohrhämmern nicht variiert werden können. Der Bohrhammer eignet sich, um damit weitere Erkenntnisse zum Hammerbohrprozess zu generieren. Ein wichtiges Gestaltmerkmal bei Bohrhämmern ist der Umsetzwinkel: Der Winkel, um welcher der Bohrer zwischen zwei Schlägen gedreht wird. Dieser Umsetzwinkel besitzt einen großen Einfluss auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission. Ob ein Umsetzwinkel optimal ist, hängt jedoch vom verwendeten Bohrer, dem Untergrund, der Einzelschlagenergie und weiteren Parameter ab (Frey et al., 2003; Vonnemann, 1977; Wiedner, 2008). Optimale Umsetzwinkel zu identifizieren benötigt daher eine hohe Versuchsanzahl. In konventionellen Bohrhämmern ist der Umsetzwinkel durch die mechanische Getriebeübersetzung zwischen Bohr- und Schlagantrieb festgelegt. Um diesen Umsetzwinkel in einer Studie zu verändern, muss für jeden zu untersuchenden Umsetzwinkel ein neues Getriebe bereitgestellt werden, was einen hohen Aufwand bedeutet. Mit dem Bohrhammer *DualDrive* kann einerseits der Umsetzwinkel beim Hammerbohren allein durch eine geänderte Motoransteuerung variiert werden. Andererseits können relevante Faktoren wie die Vorschubkraft, Schlagfrequenz oder Einzelschlagenergie unabhängig eingestellt werden. Erkenntnisse zum Umsetzwinkel beim Hammerbohren können damit gezielter und übertragbarer erzeugt werden.

Ein weiteres Potential des Bohrhammers *DualDrive* und der Motoransteuerung *CIID* liegt in der Nutzung zur Erforschung von Ersatzuntergründen durch die hiermit nun mögliche unabhängige Einstellung der Faktoren Vorschubkraft, Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie. Ersatzuntergründe können in der Validierung von Bohrhämmern eingesetzt werden, um den zu bohrenden Untergrund zu ersetzen.

Da Ersatzuntergründe, im Vergleich zu heterogenem Beton, konstante Eigenschaften besitzen, reduziert dies die Versuchsstreuung und damit die notwendige Versuchszahl. Zusätzlich können Kosten und Ressourcen gespart werden, da weniger Beton für Bohrhammertests verbraucht wird. Jedoch müssen auch diese Ersatzuntergründe in ihren Eigenschaften auf den zu prüfenden Testfall abgestimmt werden, um den Beton wirkungsäquivalent ersetzen zu können. (Bruchmüller, 2020)

Besonders relevant ist die Validierung des Ersatzuntergrundes auf die Anregung durch verschiedene Schlagfrequenzen und Einzelschlagenergien, da dies dem Test mit unterschiedlichen Bohrhämmern entspricht (Wiedner, 2008). Durch konventionelle Bohrhämmer kann immer nur eine Kombination von multikollinear verbundener Schlagfrequenzen und Einzelschlagenergie getestet werden. Ersatzuntergründe können daher aktuell nur diskret mit bereits bestehenden Bohrhämmern validiert werden (Bruchmüller, 2020). Der Einsatz von Ersatzuntergründen für neue Bohrhämmer, welche eine bis dahin nicht getestete Kombination von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie aufweisen, ist daher nicht validiert. Der Bohrhämmer *DualDrive* in Kombination mit der Motoransteuerung *CIID* macht es erstmalig möglich, Ersatzuntergründe bohrhammerunabhängig zu validieren, da nun die Schlagfrequenz und die Einzelschlagenergie unabhängig voneinander eingestellt werden können. Hierdurch können schon in der Erforschung von Ersatzuntergründen diese so abgestimmt werden, dass auch neue Bohrhämmer wirkungsäquivalent getestet werden können.

Optimierung der zyklischen Ansteuerung CIID

Mit *CIID* als konstante und zyklische Motoransteuerung konnte gezeigt werden, dass die Einzelschlagenergie in einem Bereich unabhängig von der Schlagfrequenz variiert werden kann. Weitere Optimierungen könnten daher das Ziel haben, diesen Bereich zu vergrößern, um somit eine größere Variation der Einzelschlagenergie bei gleicher Schlagfrequenz zu ermöglichen. Über den Steuerwinkel β wurde die Einzelschlagenergie bisher variiert. Hierfür wurde die Solldrehzahl zyklisch über den Kurbelwinkel geändert. Neben den in dieser Arbeit variierten Parameter der Motoransteuerung gibt es weitere Parameter, welche in dieser Arbeit nicht verändert wurden, aber Potential für eine weitere Optimierung der Motoransteuerung haben. Hervorzuheben ist hier das Winkelverhältnis des Bereiches der maximalen und minimalen Solldrehzahl oder die Drehzahldifferenz der Solldrehzahlen. Auch eine Optimierung des Reglers könnte es ermöglichen, die Einzelschlagenergie gezielter und in einem größeren Bereich zu variieren. Die Optimierung einer solchen zyklischen Ansteuerung zeigt Paulos et al. (2018) für die Steuerung von sechs Freiheitsgraden einer Drohne mit nur zwei Aktoren.

Bisher wurden die Regelparameter der Motoransteuerung *CIID* für jede Schlagfrequenz experimentell bestimmt. Die Einzelschlagenergie verändert sich, da die dynamische Abstimmung im elektropneumatischen Schlagwerk variiert wird. Der Flugkolben im Schlagwerk besitzt einen Freiheitsgrad. Die Bewegung des Flugkolbens besser zu verstehen, würde es ermöglichen, die Einzelschlagenergie gezielter einstellen zu können. Dies ist besonders relevant, wenn die Motoransteuerung *CIID* bei verschiedenen Schlagfrequenzen eingesetzt werden soll, da die Schlagfrequenz die dynamische Abstimmung stark beeinflusst. Simulative Untersuchungen oder eine messtechnische Erfassung der Bewegung des Flugkolbens würden das Systemverständnis steigern und könnten dazu beitragen, die dynamische Abstimmung im Schlagwerk besser zu verstehen und hierdurch die Regelparameter der Motoransteuerung *CIID* simulativ zu ermitteln. Die simulativen Untersuchungen könnten sich hierbei wieder an den Untersuchungen von Paulos und Yim (2018) orientieren, welche die zyklische Drohnensteuerung optimierten.

Beim Hammerbohren werden verschiedene Bohrer verwendet und in verschiedene Untergründe gebohrt. Bei diesen unterschiedlichen Anwendungsfällen sind verschiedene Bohrparameter optimal. Die Motoransteuerung *CIID* kann diese Bohrparameter einstellen. Jedoch ist es bisher nicht möglich, automatisiert zu ermitteln, welche Bohrparameter im jeweiligen Fall optimal sind. Basierend auf internen Gerätedaten und virtuellen Sensoren könnte der Anwendungsfall erkannt werden, wie es schon für das System Winkelschleifer gezeigt wurde (Dörr, 2023). Eine Anwendungsfallerkennung beim Hammerbohren könnte optimale Bohrparameter ermitteln. Die Motoransteuerung *CIID* könnte daraufhin diese Bohrparameter einstellen. Die Kombination von *CIID* mit einer Anwendungsfallerkennung würde damit eine Regelung ermöglichen, mit welcher Hammerbohren immer mit optimalen Parametern möglich wäre.

Nutzung einer zyklischen Ansteuerung für weitere Power-Tools

Die zyklische Motoransteuerung *CIID* wurde bisher mit dem Bohrhämmer *DualDrive* untersucht, aber noch nicht in einem konventionellen Bohrhämmer mit mechanisch gekoppeltem Antriebsstrang. Da bisher nur das Schlagwerk zyklisch angesteuert wurde, ist unklar, ob dies auch in konventionellen Bohrhämmern möglich ist. Bei diesen befindet sich zusätzlich die Rotation des Bohrers über das Getriebe im Leistungsfluss. Untersuchungen von Bruchmüller (2020) zeigten auf, dass das Bohrmoment am Bohrer ebenfalls zyklisch mit der Schlagfrequenz verläuft. Es ist daher denkbar, dass eine zyklische Ansteuerung mit *CIID* auch in konventionellen Bohrhämmern mit nur einem Motor möglich ist. Die Untersuchung der Auswirkungen der Motoransteuerung *CIID* auf das Hammerbohren mit einem konventionellen

Bohrhammer ist daher eine vielversprechende Forschungsrichtung. Durch die stetig steigenden Leistungsdichten der Antriebe werden konventionelle Bohrhämmer bereits heute mit einer einstellbaren und konstanten Motordrehzahl beworben (Robert Bosch GmbH, o. D.). Diese hohe Leistungsdichte wird auch benötigt, um mit der Motoransteuerung *CIID* in der Phase einer hohen Solldrehzahl den Motor durch hohe Motormomente ausreichend beschleunigen zu können. Eine zyklische Motoransteuerung mit *CIID* zur Variation der Einzelschlagenergie könnte daher der nächste Entwicklungsschritt sein.

Ein weiterer Ansatz wäre es, *CIID* auf weitere Power-Tools zu übertragen. Meißelhämmer besitzen nur ein Schlagwerk, jedoch ohne ein mechanisches Getriebe für die Rotation des Werkzeugs. Eine Integration wäre daher ohne mechanische Veränderung des Meißelhammers möglich. Es wäre aber zu untersuchen, ob Wechselwirkungseffekte zwischen Meißelprozess und *CIID* auftreten, da sich der diskrete Meißelprozess vom kontinuierlichen Hammerbohren unterscheidet.

Eine weitere Option wäre die Integration in Tangential-Schlagschrauber. Hier können die Schläge über das erreichbare maximale Drehmoment und über die Energie bewertet werden. Das Ziel wäre es, das erreichbare maximale Drehmoment bei gleichbleibender Schlagfrequenz zu variieren. Das maximale Drehmoment ist bei Schlagschraubern die Größe, welche in verschiedenen Stufen eingestellt werden kann. Das Drehmoment wird bisher über eine Änderung der Schlagfrequenz eingestellt. Die Reduktion der Schlagfrequenz bedeutet aber auch eine Reduktion der Produktivität, da das maximale Drehmoment durch weniger Schläge pro Sekunde langsamer erreicht wird. Eine Möglichkeit, das maximale Drehmoment unabhängig von der Schlagfrequenz zu variieren, wurde von Lee et al. (2013) simulativ untersucht. Diese haben die Motordrehzahl sinusförmig vorgegeben und simulativ gezeigt, dass dies einen Einfluss auf das Drehmoment haben kann.

Allerdings konnten die simulativ erzielten Ergebnisse bisher nicht experimentell bestätigt werden. Ein Grund dafür könnte sein, dass es regelungstechnisch aufwändig ist, die Motordrehzahl einem sinusförmigen Verlauf folgen zu lassen. Die reine Vorgabe der Solldrehzahl durch *CIID* ist regelungstechnisch einfacher. Da der Antriebsstrang von Tangential-Schlagschraubern eine nicht starre Kopplung im Leistungsfluss aufweist, wäre es sehr interessant und experimentell zu überprüfen, ob mit *CIID* das maximale Drehmoment unabhängig von der Schlagfrequenz variiert werden kann.

Anwenderabhängige Anpassung des Betriebspunktes durch CIID

Die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission des Bohrhammers müssen gemeinsam betrachtet werden, um die Vibrationsexposition auf den Anwender reduzieren zu können. Es konnte für professionelle Anwender gezeigt werden, dass mit steigender Bohrgeschwindigkeit auch die Vibrationsemission des Bohrhammers steigen kann (Lindenmann et al., 2021; Uhl et al., 2021). Es ist nicht möglich allgemeine Aussage über einen optimalen Trade-off zwischen Bohrgeschwindigkeit auch Vibrationsemission zu treffen (Cronjäger & Jahn, 1985; Rempel et al., 2019; Schenk, 1997). Für weitere ergonomische Optimierungen des Hammerbohrens müssen daher Effekte auf die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission besser verstanden werden.

Mit der Motoransteuerung *CIID* und damit der unabhängigen Einstellung von Schlagfrequenz und Einzelschlagenergie kann der Betriebspunkt und damit die Bohrgeschwindigkeit und die Vibrationsemission beim Hammerbohren neuartig beeinflusst werden. Neben dem Betriebspunkt des Bohrhammers hat auch die mechanische Impedanz des Anwenders einen Einfluss auf die Vibrationsemission des Bohrhammers (Matthiesen, Mangold et al., 2018). Heterogene Anwendereigenschaften oder Veränderungen von Greif-, Andruckkraft oder Körperhaltung haben einen Effekt auf die mechanische Impedanz (Lindenmann et al., 2022; Lindenmann, 2023; Matthiesen, Mangold et al., 2018). Es ist auch möglich, basierend auf internen Gerätedaten die Körperhaltung des Anwenders zu schätzen (Helmstetter & Matthiesen, 2023). Ebenso können Anwenderkräfte gemessen oder aus internen Gerätedaten geschätzt werden (Dörr, 2023; Lindenmann et al., 2021).

Man könnte daher Ansätze zur Erfassung von Greifkräften, Andruckkräften oder Körperhaltungen mit *CIID* kombinieren. So könnte ein Bohrhammer mit *CIID* den Betriebspunkt in Abhängigkeit von den erfassten Greif-, Andruckkräften oder Körperhaltungen ändern, um durch eine Reduktion der Vibrationsexposition die Ergonomie der Anwendung zu erhöhen. Eine solche automatisierte Anpassung zur Steigerung der Performance würde das System aus Bohrhammer und Anwender im Kontext der Mensch-Maschinen-Symbiose stärker zusammenbringen (Inga et al., 2023).

Literaturverzeichnis

- Albers, S. (2009). *Methodik der empirischen Forschung* (Springer eBook Collection Business and Economics, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Gabler Verlag.
- 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>
- Andersson, E.R. (1990). Design and testing of a vibration attenuating handle. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 6(2), 119–125.
<https://doi.org/10.1016/0169-8141%2890%2990017-V>
- Anton, D., Shibley, L. D., Fethke, N. B., Hess, J., Cook, T. M. & Rosecrance, J. (2001). The effect of overhead drilling position on shoulder moment and electromyography. *Ergonomics*, 44(5), 489–501.
<https://doi.org/10.1080/00140130120079>
- 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>
- Arditi, D. & Mochtar, K. (2000). Trends in productivity improvement in the US construction industry. *Construction Management and Economics*, 18(1), 15–27. <https://doi.org/10.1080/014461900370915>
- Babitsky, V. I. (1998). Hand-Held Percussion Machine as Discrete Non-Linear Converter. *Journal of Sound and Vibration*, 214(1), 165–182.
<https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1559>
- Binder, A. (2017). *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53241-6>

- 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(8), 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(9), 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. (2018). 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. (2020). Realitätsnahe und reproduzierbare Randbedingungen in der Vibrationsanalyse - Ein Ersatzuntergrund für elektropneumatische Bohrhämmer. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 126). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000117558>
- 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>
- 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>

- Chitkara, K. K. (2019). *Construction project management. Planning, scheduling and controlling* (Fourth edition). New Delhi, India: McGraw-Hill Education (India) Private Limited.
- Cohen, J. (2013). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Hoboken: Taylor and Francis. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=1192162>
- Cronjäger, L. & Jahn, R. (1985). *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 EN 206:2021-06. *Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN_206:2013+A2:2021*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN CEN/TR 15350:2022-12. *Mechanische Schwingungen_ - Anleitung zur Beurteilung der Belastung durch Hand-Arm-Schwingungen aus Angaben zu den benutzten Maschinen einschließlich Angaben von den Maschinenherstellern; Deutsche Fassung CEN/TR_15350:2020*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO, 5349-1:2001 (2001). *Mechanische Schwingungen - Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen; Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 5349-1:2001) Deutsche Fassung EN ISO 5349-1:2001*. 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., McDowell, T. W. & Wu, J. Z. (2006). Measurement of biodynamic response of human hand–arm system. *Journal of Sound and Vibration*, 294(4-5), 807–827. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.12.047>
- Dong, R. G., Wu, J. Z. & Welcome, D. E. (2005). Recent advances in biodynamics of human hand-arm system. *Industrial Health*, 43(3), 449–471. <https://doi.org/10.2486/indhealth.43.449>
- Dörr, M. J. (2023). Erfassung von Informationen zur Produktnutzung beim Schleifen mit Power-Tools auf Basis von Daten eines Sensormoduls. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 169). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000163459>
- Eaves, S., Gyi, D. E. & Gibb, A. G. F. (2016). Building healthy construction workers: Their views on health, wellbeing and better workplace design. *Applied Ergonomics*, 54, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.11.004>
- 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)
- Europäische Union. (2006). Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung). Richtlinie 2006/42/EG.
- Farrar, D. E. & Glauber, R. R. (1967). Multicollinearity in Regression Analysis: The Problem Revisited. *The Review of Economics and Statistics*, 49(1), 92. <https://doi.org/10.2307/1937887>
- Fisher, R. A. (1926). *The arrangement of field experiments*. <https://doi.org/10.23637/rothamsted.8v61q>
- 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.ijrmmms.2011.05.007>
- Frey, C. W., Jacobasch, A., Kuntze, H.-B. & Plietsch, R. (2003, 14.–19. September). Smart neuro-fuzzy based control of a rotary hammer drill. In 2003

IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422) (2634-2639 vol.2). IEEE.

- Fridén, J. (2001). Vibration damage to the hand: clinical presentation, prognosis and length and severity of vibration required. *Journal of Hand Surgery (Edinburgh, Scotland)*, 26(5), 471–474. <https://doi.org/10.1054/jhsb.2001.0633>
- Gao, P.-F., Zhi, J.-Y., Hu, J.-D., Wang, J., Xu, Y.-S., Zou, R. et al. (2024). The factors affecting the performance of the tunnel wall drilling task and their priority. *Scientific Reports*, 14(1), 9564. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60381-3>
- Gerhardsson, L., Balogh, I., Lambert, P.-A., Hjortsberg, U. & Karlsson, J.-E. (2005). Vascular and nerve damage in workers exposed to vibrating tools. The importance of objective measurements of exposure time. *Applied Ergonomics*, 36(1), 55–60. <https://doi.org/10.1016/J.APERGO.2004.09.001>
- 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>
- Gujarati, D. N. & Porter, D. C. (2009). *Basic econometrics* (The McGraw-Hill series Economics, 5. ed.). Boston, Mass.: McGraw-Hill Irwin.
- Hackl, P. (2013). *Einführung in die Ökonometrie* (Wi - Wirtschaft, 2., aktualisierte Auflage). München, Harlow, Amsterdam: Pearson Higher Education. Verfügbar unter: <https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9783863266134>
- Hae-Young Kim. (2014). Analysis of variance (ANOVA) comparing means of more than two groups. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 39(1), 74–77. <https://doi.org/10.5395/rde.2014.39.1.74>
- Hasan, A., Baroudi, B., Elmualim, A. & Rameezdeen, R. (2018). Factors affecting construction productivity: a 30 year systematic review. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(7), 916–937. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2017-0035>
- Hecker, R. (1983a). Eine Fallstrecke für Impuls- und Bohrleistungsmessungen beim schlagenden Bohren. *Glückauf-Forschungshefte: Zeitschrift zur Verbreitung von Forschungsergebnissen im Bergbau* 44, (3), 110–113.

- Hecker, R. (1983b). *Stoß- und Schallprobleme beim schlagenden Bohren* (Reihe 11: Schwingungstechnik - Lärmbekämpfung, Bd. 52). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Hecker, R. (1986). Wellenausbreitungs- und Gesteinszertrümmerungsvorgänge beim schlagenden Bohren. *Glückauf-Forschungshefte: Zeitschrift zur Verbreitung von Forschungsergebnissen im Bergbau* 47, (4), 191–197.
- Hecker, R. & Riederer, H. (1985). *Reduzierung der Lärm- und Vibrationsbelastung beim Arbeiten mit elektrischen Bohr- und Schlaghämmern* (Forschungsberichtsreihe Humanisierung des Arbeitslebens).
- Helmstetter, S. & Matthiesen, S. (2023). Human Posture Estimation: A Systematic Review on Force-Based Methods-Analyzing the Differences in Required Expertise and Result Benefits for Their Utilization. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23(21). <https://doi.org/10.3390/s23218997>
- Inga, J., Ruess, M., Robens, J. H., Nelius, T., Rothfuß, S., Kille, S. et al. (2023). Human-machine symbiosis: A multivariate perspective for physically coupled human-machine systems. *International Journal of Human-Computer Studies*, 170(5), 102926. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2022.102926>
- DIN EN ISO 28927-10:2011 (2011). *Hand-held portable power tools - Test methods for evaluation of vibration emission - Part 10: Percussive drills, hammers and breakers (DIN EN ISO 28927-10:2011)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 10068:2012-12 (2012). *Mechanical vibration and shock - Mechanical impedance of the human hand-arm system at the driving point (ISO 10068:2012-12)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- 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 Spec No), 343–346. <https://doi.org/10.5271/sjweh.2132>
- Jahn, R. (1985). *Einflußgrößen auf die Beschleunigungen elektropneumatischer Bohrhämmer*. Dissertation. Universität Dortmund, Dortmund.

- Keselman, H. J. & Rogan, J. C. (1978). A Comparison of the Modified-Tukey and Scheffé Methods of Multiple Comparisons for Pairwise Contrasts. *Journal of the American Statistical Association*, 73(361), 47–52.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1978.10479996>
- Kivade, S. B., Murthy, C. S.N. & Vardhan, H. (2015). Experimental Investigations on Penetration Rate of Percussive Drill. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11(1), 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.012>
- Kloek, R. P.W.J., Bos, J. & Marck, R. M.S. v.d. (1994). The development and testing of a mobile drilling robot. In D. Chamberlain (Hrsg.), *Automation and Robotics in Construction XI* (S. 63–70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-82044-0.50013-8>
- Kockelkorn, U. (2000). *Lineare statistische Methoden*. de Gruyter.
<https://doi.org/10.1515/9783486787825>
- Krajnak, K., Riley, D. A., Wu, J., McDowell, T., Welcome, D. E., Xu, X. S. et al. (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>
- Krom, R. (1994). Providing a drilling robot with the right instructions. In D. Chamberlain (Hrsg.), *Automation and Robotics in Construction XI* (S. 71–78). Elsevier. Verfügbar unter:
https://www.iaarc.org/publications/fulltext/Providing_a_drilling_robot_with_the_right_instructions.PDF
- Krom, R., Kloek, R. & Vos, C. (1993). The development of a drilling robot for the installation of railway tracks. In G. H. Watson, R. L. Tucker & J. K. Walters (Eds.), *Automation and robotics in construction X. Proceedings of the 10th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), Houston, Texas, U.S.A., 24 - 26 May, 1993* (S. 347–354). Amsterdam: Elsevier. Verfügbar unter:
https://www.iaarc.org/publications/fulltext/The_development_of_a_drilling_robot_for_the_installation_of_railway_tracks.PDF
- Lantz, B. (2013). The impact of sample non-normality on ANOVA and alternative methods. *The British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 66(2), 224–244. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8317.2012.02047.x>

- Lee, J., Ko, D.-S., Chun, H.-H. & Hur, D.-J. (2013, 20. Oktober). Control strategies for manipulating contact force of Impact Wrench to generate high level torque. In *2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013)* (S. 1758–1765). IEEE.
- 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*, 103430. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103430>
- Lindenmann, A. (2023). Analyse der Schwingungseigenschaften des menschlichen Hand-Arm-Systems in translatorischer Richtung und deren Abbildung in einem einstellbaren Hand-Arm-Modell. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 166). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000161145>
- Lindenmann, A., Schröder, T., Germann, R., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2022). Effect of high level grip-and push force and elevated arm posture on the zh-axis hand-arm impedance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *92*(3), 103375. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2022.103375>
- Liu, S., Chang, H., Li, H. & Cheng, G. (2017). Numerical and experimental investigation of the impact fragmentation of bluestone using multi-type bits. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *91*, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.11.006>
- Mangold, S. (2019). Erfassung heterogener passiver Anwendereigenschaften und deren Abbildung in einem einstellbaren Hand-Arm Modell am Beispiel eines Impulsschraubers. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 125). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000118163>
- 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., Mangold, S. & Bruchmueller, T. (2018). The influence of varying passive user interactions on power tools in the context of product development. *Forschung im Ingenieurwesen*, 82(2), 157–168. <https://doi.org/10.1007/s10010-018-0269-x>
- Matthiesen, S., Behrendt, M., Gwosch, T., Bruchmueller, T. & Schaefer, T. (2018). *IPEK-XiL-Ansatz und IPEK-XiL-Framework für Power-Tools*. <https://doi.org/10.5445/IR/1000080086>
- McDowell, T. W., Wiker, S. F., Dong, R. G. & Welcome, D. E. (2007). Effects of vibration on grip and push force-recall performance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37(3), 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2006.10.024>
- 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>
- Nalbach, M. (2009). *EPTA Procedure 05/2009. Measurement of the single impact energy for rotary hammers and breakers* (The European Power Tool Association, Hrsg.). Frankfurt.
- 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>
- Ofir, C. & Khuri, A. (1986). Multicollinearity in marketing models: Diagnostics and remedial measures. *International Journal of Research in Marketing*, 3(3), 181–205. [https://doi.org/10.1016/0167-8116\(86\)90023-6](https://doi.org/10.1016/0167-8116(86)90023-6)
- Ortner, M. & Kromoser, B. (2023). Influence of different parameters on drilling forces in automated drilling of concrete with industrial robots. *Automation in Construction*, 150(2), 104814. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104814>

- Ortner, M., Schwenn, M. & Kromoser, B. (2024). Comparison of pull-out capacities of robotically and manually drilled and set fasteners. *0926-5805*, *161*(2), 105365. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105365>
- 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)
- Paulos, J., Caraher, B. & Yim, M. (2018, 21.–25. Mai). Emulating a Fully Actuated Aerial Vehicle Using Two Actuators. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (S. 7011–7016). IEEE.
- Paulos, J. & Yim, M. (2013). An underactuated propeller for attitude control in micro air vehicles. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 3 - 7 Nov. 2013, Tokyo, Japan ; conference digest (S. 1374–1379). Piscataway, NJ: IEEE.
- Paulos, J. & Yim, M. (2015). Flight performance of a swashplateless micro air vehicle. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2015)*. Seattle, Washington, USA, 26 - 30 May 2015 (S. 5284–5289). Piscataway, NJ: IEEE.
- Paulos, J. & Yim, M. (2018). Cyclic Blade Pitch Control Without a Swashplate for Small Helicopters. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, *41*(3), 689–700. <https://doi.org/10.2514/1.G002683>
- Poole, C. J. M., Bovenzi, M., Nilsson, T., Lawson, I. J., House, R., Thompson, A. et al. (2019). International consensus criteria for diagnosing and staging hand-arm vibration syndrome. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, *92*(1), 117–127. <https://doi.org/10.1007/s00420-018-1359-7>
- Porta, M. S. (Hrsg.). (2014). *A dictionary of epidemiology* (Oxford quick reference, Sixth edition). Oxford: Oxford University Press. Retrieved from <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=765961>
- 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. (2015). A Universal Rig for Supporting Large Hammer Drills: Reduced Injury Risk and Improved Productivity. *Safety Science*, 78, 20–24. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.04.003>
- 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>
- Riederer, H. (1985). *Untersuchungen zur Dynamik elektropneumatischer Bohrhämmer*. Dissertation. Universität Dortmund, Dortmund.
- Robert Bosch GmbH. (o. D.). *Produktdatenblatt GBH 18V-26*. Zugriff am 29.06.2024. Verfügbar unter: <https://www.bosch-professional.com/de/de/pdf/productdata/gbh-18v-26-sheet.pdf>
- Elektrowerkzeuge und ihre Anwendung. 1500 Fragen und Antworten*. (2003) (1. Aufl., Red.-Schluss: 02.04.2003). Konstanz: Christiani.
- Schäfer, T. (2018). Ein gesamtsystemischer Ansatz zur simulationsgestützten Analyse und Optimierung eines Bohrhammerschlagwerkes. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 111). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000085321>
- Schenk, T. (1997). Schwingungsminderung - Bohrwerkzeuge: Verminderung der Schwingungsbelastung des Hand-Arm-Systems durch Optimierung von Hammerbohrwerkzeugen. *Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse*, (Nr. 104).
- Schröder, T., Lindenmann, A. & Matthiesen, S. (2023). Influence of Coupling Forces and Body Posture on the Rotational Hand–Arm Impedance in yh Direction. *Vibration*, 6(2), 375–398. <https://doi.org/10.3390/vibration6020023>

- Schröder, T., Lindenmann, A., Resch, A., Matthiesen, S. & Gwosch, T. (2023). Influence of coupling forces on the mechanical impedance of the hand-arm system during rotational vibration excitation around the xh-axis. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 95(43), 103427. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103427>
- Schweizer, H. H. (2004). *Schlagbohrmaschinen, Bohrhämmer und Diamantbohrmaschinen* (1. Auflage) (Robert Bosch GmbH Geschäftsbereich Elektrowerkzeuge, Hrsg.). Leinfelden-Echterdingen.
- Siebertz, K. (2010). *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE)* (VDI-Buch Ser). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=571779>
- Sieling, P. (1977). *Untersuchungen Zum Drehschlagschrauben* (Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Ser., v.2644). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften GmbH. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6856319>
- Steffen, A. (1994). *Das Problem der Multikollinearität in Regressionsanalysen* (Europäische Hochschulschriften Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft, Bd. 1553). Zugl.: Bonn, Univ., Diss., 1994. Frankfurt am Main, Berlin: Lang.
- Todorov, G., Peikov, V., Kamberov, K. & Nikolov, N. (2010). Power Tools Pneumatic Impact Mechanism Modelling and Robust Analysis. In S. Kuzmanović (Hrsg.), *The Sixth International Symposium about forming and design in mechanical engineering* (S. 119–124).
- Uhl, M. (2022). Analyse des Einflusses von Querkräften beim Hammerbohren auf die Arbeitsproduktivität und die Schwingungseinwirkung auf den Menschen. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 148). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000151597>
- 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(1), 398–407. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.06.016>

- Uhl, M., Gauch, M., Robens, J.-H., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2022). Analysis of the influence of feed and lateral force on productivity and hand-arm vibration in interaction with drill bit wear and concrete strength. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 92, 103347. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2022.103347>
- 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. (2023). Factors on vibrational harm during hammer drilling – Influences of lateral force, feed force, hammer drill and drill bit type. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 94, 103418. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103418>
- Uhl, M., Robens, J. H., Gauch, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2023). Does the user behavior effect the productivity of hammer drilling? – Analysis of the influences of feed and lateral force. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 94, 103400. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2022.103400>
- Vonnemann, G. (1977). *Energetische Betrachtungen zum schlagenden Bohren in Beton*. Dissertation. Universität Dortmund, Dortmund.
- Wallace, P. (2015). Energy, Torque, and Dynamics in Impact Wrench Tightening. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(2). <https://doi.org/10.1115/1.4028750>
- 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*.
- Welcome, D. E., Dong, R. G., Xu, X. S., Warren, C., McDowell, T. W. & Wu, J. Z. (2015). An examination of the vibration transmissibility of the hand-arm system in three orthogonal directions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 45, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.11.001>
- Wettstein, A. (2021). Analyse und Simulation tangential-schlagender Anziehprozesse : Ein tribologisches Simulationsmodell zur Beschreibung von Schraubenanziehverfahren. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.),

Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse (Bd. 138). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000140478>

- Wettstein, A., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021). Modeling dynamic mechanical system behavior using sequence modeling of embodiment function relations: case study on a hammer mechanism. *SN Applied Sciences*, 3(1), 189. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04149-8>
- Wettstein, A., Kretschmer, T. & Matthiesen, S. (2020). Investigation of dynamic friction during impact tightening of bolted joints. *Tribology International*, 146(2), 106251. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106251>
- Wiedner, A. (2008). *Kybernetische Systemanalyse und Entwicklung von Konzepten für das Abstellen von Erregerzylinderschlagwerken*. Diplomarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Würsch, C., Schmitzer, H. & Schaer, R. (2004). *EP1607186A1 - Elektropneumatischer Bohr-/Meißelhammer mit veränderbarer Schlagenergie*. Hilti Aktiengesellschaft (Anmelder), EP1607186A1.
- Yan, S., Huang, S. & Zou, F. (2016). Analysis of the dynamic characteristics of gas chamber in rotary hammer. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 10(4). <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2016jamdsm0066>
- Zhang, W., Wang, Q., Xu, Z., Xu, H., Li, H., Dong, J. et al. (2021). An Experimental Study of the Influence of Hand-Arm Posture and Grip Force on the Mechanical Impedance of Hand-Arm System. *Shock and Vibration*, 2021(4), 1–11. <https://doi.org/10.1155/2021/9967278>
- Ziegler, J. G. & Nichols, N. B. (1942). Optimum Settings for Automatic Controllers. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 64(8), 759–768. <https://doi.org/10.1115/1.2899060>
- Zimmerman, J., Bain, J., Persson, M. & Riley, D. (2017). Effects of power tool vibration on peripheral nerve endings. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 62(4), 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.08.012>
- Zimprich, S., Matter, F., Reiser, J., Robens, J. H. & Matthiesen, S. (2023). The effect of feed force on vibration and productivity in hammer drilling: A machine-

independent analysis excluding the effect of motor speed reduction.
International Journal of Industrial Ergonomics, 98, 103524.
<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103524>

Zimprich, S., Reiser, J., Matter, F., Robens, J. H. & Matthiesen, S. (2026).
Optimizing Drilling Parameters: A Novel Cyclical Motor Control Concept to
Adjust the Impact Energy Independently of the Frequency for Impact
Mechanisms. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/100011284>

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co- betreut wurden:

Anstötz, B. (2022). *Experimentelle Charakterisierung eines hydraulisch-mechanischen
Ersatzuntergrunds für Bohrhämmer durch zyklische Impulsbelastung*
[Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Ballreich, M. (2024). Untersuchung der Gestaltmerkmale von Holzschrauben und ihrer
Auswirkungen auf die Spaltkraft [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher
Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Bihr, N. (2023). *Erfassung hochfrequenter Drehmomentanteile durch eine neuartige
Regelungsstrategie* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für
Technologie (KIT), Karlsruhe.

Blacha, J. (2023). *Erweiterung des Anwendungsfeldes der E-Paper-Technologie
anhand der Entwicklung einer batteriebetriebenen Outdoor-Uhr* [Unveröffentlichte
Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Bruder, F. (2024). *Bestimmung des Drehwinkels einer Schraube durch geräteinterne
Daten eines Schlagschraubers durch den Ansatz eines virtuellen Sensors*
[Unveröffentlichte Seminararbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Karlsruhe.

Dávila-Portals, D. (2022). *Heizstrategien für ein portables Brennstoffzellen-
Stromversorgungssystem während des Kaltstarts für Zuverlässigkeit und Effizienz*
[Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Erchen, R. (2024). *Erhöhung der Robustheit durch eine datengetriebene Optimierung eines impulsgetriebenen Anziehverfahrens von Betonanker* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Fakler, R. (2021). *Experimentelles Testen von ausgewählten Schadenshypothesen – Schädigungen am Taumellager* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Frohnmaier, D. (2021). *Konzeption und Konstruktion einer einstellbaren Konstantdrehzahlseinheit für Bohrhämmer* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Katgely, M. (2019). *Entwicklung eines Funktionsträgers zur frühzeitigen Verifikation und Validierung in der Meißelhammerentwicklung* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Keller, C. (2021). *Konstruktion eines hydraulischen Stoßdämpfers als Ersatzuntergrund für Bohrhämmer* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kleinhans, L. (2023). *Entwicklung einer selbstbohrenden Holzschraube mit reduziertem Einschraubmoment und verbessertem Anbeißverhalten* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Krämer, S. (2019). *Entwicklung einer Mehrkörpersimulation für einen Bohrerhammer im Schlagbohrbetrieb mit MSC ADAMS* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Lehmann, A. (2020). *Untersuchung des Einflusses verschiedener Andruckkräfte auf die Vibrationsemission eines Bohrerhammers unter Verwendung des Untergrundersatzsystems Dynaload* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Link, A. (2020). *Konstruktion eines Prüfstands für einen Ersatztest zur Analyse des Bohrfortschritts beim Hammerbohren* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Liu, Z. (2019). *Bestimmung von Einflussparametern auf den Stoßkontakt zwischen Flugkolben und Schlagbolzen durch FEM-Simulation* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Matter, F. (2022). *Entwicklung und Validierung eines neuartigen Bohrhammers zur experimentellen Untersuchung der Einflüsse von Vorschubkraft und Schlagfrequenz auf den Bohrprozess* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Markowetz, J. (2023). *AI-based Calculation of Dust Bag Fill Levels Using Physical Sensor Readings* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Niebel, A. (2022). *Konstruktion und Optimierung eines Prüfstandes zur Messung von hochfrequenten Drehimpulsen* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Reiser, J. (2022). *Entwicklung und experimentelle Untersuchung einer neuen Steuermethode für elektropneumatische Schlagwerke mit einstellbarer Einzelschlagenergie bei unabhängiger Motordrehzahl* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Schauer, L. (2023). *Entwicklung einer neuartigen Motorsteuerungsmethode zur Entkopplung von Schlagenergie und -frequenz für einen Schlagschrauber* [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Zhang, Y. (2019). Bestimmung von Einflussparametern auf die Impulsübertragung in Bohrern mittels der FEM-Analyse [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Veröffentlichungen unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit

- Dörr, M., Dürkopp, A., Zimprich, S., Gwosch, T., Gittel, H.-J., Pelshenke, C. et al. (2021). Approach for Modelling the Dynamic Transmission Behavior of Grinding Discs Using Transfer Functions. In *Proceedings of ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 7B: Dynamics, Vibration, and Control*. ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2021-69393>
- Dörr, M., Dürkopp, A., Zimprich, S., Gwosch, T., Gittel, H.-J., Pelshenke, C., Dültgen, P. & Matthiesen, S. (2019). Experimental Abrasive Contact Analysis – Dynamic Forces between Grinding Discs and Steel for common Angle Grinder Applications. In C. Broeckmann (Hrsg.), *Proceedings of the 11th TOOLING conference & Exhibition*. Aachen: TEMA Technologie Marketing AG.
- Foser, R., Köpfer, X., Reichard, J., Neubauer, S., Basalla, F., Fuchs, L., Schumann, J., Zimprich, S., Matthiesen, S. (2021). Bohreinsatz, Bohrfutteraufsatz für den Bohreinsatz sowie Bohrfutter für den Bohreinsatz (EP 4366924 A1). Europäische Patentorganisation (EPO). Zugriff am 30.05.2024. <https://patents.google.com/patent/EP4366924A1>
- Grauberger, P., Bruchmüller, T., Zimprich, S. & Matthiesen, S. (2022). Considering Manufacturing in Functional Modelling - Case Study on Combination of Simulation-Driven Design with Design-for-Manufacture. *Procedia CIRP*, 109, 701–706. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.039>
- Horn, S., Zimprich, S., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2020). Ermittlung eines Designraums zur Mechatronisierung von Befestigungsmitteln am Beispiel von Verbundankern. *Beton- und Stahlbetonbau*, 115 (11), 878–886. <https://doi.org/10.1002/best.202000022>
- Mangold, S., Gerlitz, E., Zimprich, S., Friedmann, M., Matthiesen, S. & Fleischer, J. (2023). Systematic quantitative investigation of the unscrewing process with regard to breakaway torque. *Journal of Remanufacturing*, 13(1), 53–66. <https://doi.org/10.1007/s13243-022-00120-x>
- Mangold, S., Gerlitz, E., Zimprich, S. (2021). Torque-Time series [Forschungsdaten]. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000141534>

- Matthiesen, S., Dörr, M. & Zimprich, S. (2018). Testfallgenerierung - Vorgehen zur Lastkollektivermittlung durch Data Mining am Winkelschleifer. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 29. DfX-Symposium 2018* (295-306). Hamburg: TuTech Verlag.
- Seifert, L., Kleinhans, L., Kleinschrot, M., Schweizer, F., Höschele, N., Seiz, S., Gwosch, T., Helmstetter, S., Zimprich, S., Matthiesen, S. (2022). Spannvorrichtung für eine Kreissäge (DE 102022111672 B4 Deutsches Patent- und Markenamt (DPMA). Zugriff am 13.10.2024.
<https://patents.google.com/patent/DE102022111672B4/>
- Sturm, C., Gwosch, T., Zimprich, S. & Matthiesen, S. (2021). Development of a Cause-Effect Relationship Model to Identify Influences on Load Conditions that Cause Bearing Damage. In B. Castanier, M. Cepin, D. Bigaud & C. Berenguer (Hrsg.), *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference (ESREL 2021)* (S. 2924–2929). Singapore: Research Publishing Services.
- Zimprich, S., Anstötz, B. & Matthiesen, S. (2022). Hydro-mechanical Dampers for Testing high Cyclic Shock Loads in Preventive Health Protection. In *Proceedings of the 8th International Conference on Human Interaction & Emerging Technologies (IHJET 2022): Artificial Intelligence & Future Applications, August 22-24, 2022, Nice, France* (AHFE International). AHFE International.
- Zimprich, S., Dávila-Portals, D., Matthiesen, S. & Gwosch, T. (2022). New Control Strategy for Heating Portable Fuel Cell Power Systems for Energy-Efficient and Reliable Operation. *Machines*, 10(12), 1159.
<https://doi.org/10.3390/machines10121159>
- Zimprich, S., Germann, R., Helmstetter, S., Saubier, S. & Matthiesen, S. (2021). An Objective Rating Approach for Vibration Discomfort Evaluation in Power Tool Ergonomics – Examination of Higher Frequency Components. In T. Ahram, R. Tair, K. Langlois & A. Choplin (Hrsg.), *Advances in Intelligent Systems and Computing: Bd. 1253. Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications III* (S. 84–90). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55307-4_13
- Zimprich, S., Matter, F., Reiser, J., Robens, J. H. & Matthiesen, S. (2023). The effect of feed force on vibration and productivity in hammer drilling: A machine-independent analysis excluding the effect of motor speed reduction. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 98, 103524. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103524>
- Zimprich, S., Matthiesen, S. & Gwosch, T. (2022). Wasserstoff als Energieversorgung in mobilen Anwendungen am Beispiel eines Power-Tools/Hydrogen as Energy Supply

for Mobile Applications Using the Example of a Power Tool. *Konstruktion*, 74(04), 65–69. <https://doi.org/10.37544/0720-5953-2022-04-65>

Zimprich, S., Marthaler, F., Chen, S., Ehret, K., Hake, N., Kiziltug, T. (2017). Verfahren zur Energiegewinnung, Energiegewinnungseinrichtung und Messeinrichtung (DE 102017006166 A1). Deutsches Patent- und Markenamt (DPMA). Zugriff am 30.05.2024. <https://patents.google.com/patent/DE102017006166A1>

Zimprich, S., Reiser, J., Matter, F., Robens, J. H. & Matthiesen, S. (2026). Optimizing Drilling Parameters: A Novel Cyclical Motor Control Concept to Adjust the Impact Energy Independently of the Frequency for Impact Mechanisms, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/100011284>

Glossar

Begriff	Definition
Anwender	Bedienerperson eines Power-Tools. (DIN EN ISO 5349)
Beton	Baustoff, der durch Mischen von Zement, grober und feiner Gesteinskörnung und Wasser, mit oder ohne Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen oder Fasern, hergestellt wird und seine Eigenschaften durch Hydratation des Zements erhält. (DIN EN 206:2021-06)
Bohrhammer	Bohrmaschine mit Schlagwerk und ohne Luftspülung zum Bohren mit einem Einsatzwerkzeug. (Bruchmüller, 2019 und angelehnt an die ISO 5391:2003-1)
Einzel Schlagenergie	Entspricht dem Energiegehalt der Stoßwelle, welche beim Auftreffen des Schlagbolzens auf die Messstange erzeugt wird. (Angepasste Übersetzung aus Nalbach, 2009)
Elektropneumatisches Schlagwerk	Bestehen aus einem Antriebskolben und einem freifliegenden Flugkolben, die sich gemeinsam, aber mechanisch entkoppelt in einem Zylinderrohr bewegen. Bei der Vorwärtsbewegung gibt der Flugkolben beim Aufprall auf einen Schlagbolzen seine Energie an das Einsatzwerkzeug ab. Der Antriebskolben wird durch den Elektromotor angetrieben. (Angelehnt an Schweizer, 2004)
Ersatzuntergrund	Ein Ersatzuntergrund ist ein Koppelsystem, mit dem ein System-Modell-Umwelt eine definierte Wirkung auf die Maschine eines Power-Tools erzeugen kann. (Bruchmüller, 2019)
Hand-Arm-Modell	Schwingungsmodelle eines Hand-Arm Systems. (DIN 45677)
Hand-Arm-System	Ein schwingungsbelastetes Teilsystem des Menschen, bestehend aus der Hand und dem Arm. (Bruchmüller, 2019)
Motoransteuerung	Vorgabe einer Söldrehzahl an den Motorregler
Multikollinearität	Mindestens zwei Faktoren in einer Untersuchung korrelieren stark miteinander. (Albers, 2009)

Power-Tool	Power-Tools umfassen handgehaltene oder handgeführte Maschinen Power-Tools umfassen elektrisch angetriebene Maschinen und nicht elektrisch betriebene Maschinen. (DIN EN ISO 11148-13)
Schlagfrequenz	Anzahl der Schläge pro Sekunde eines Bohrhammers oder Tangential-Schlagschraubers.
Tätigkeit	Eine Tätigkeit beschreibt im Kontext von Power-Tools eine Handlung oder Aktion, die eine anwendende Person mit einem Power-Tool durchführt. (Dörr, 2023)
Vorschubkraft	Die Vorschubkraft ist diejenige Kraft, die die Maschine in Vorschubrichtung auf das Werkstück ausübt. (Uhl 2022 und angepasst aus der DIN 45679)
Zyklische Ansteuerung	Rotationsperiodische Vorgabe einer Stellgröße

Anhang A

Parametersatz der Vektorregelung des Schlagwerkantriebs

Tabelle A.1: Eingestellte Parameter der Vektorregelung im Motor-Controller VESC 6 MkV zur Regelung des Antriebsmotors des Schlagwerks

Parameter	Wert
PID Loop Rate	1000 Hz
Speed PID K_p	0,004 A/erpm
Speed PID K_i	0,004 A/(erpm*ms)
Speed PID K_d	0,0001 (A*ms)/erpm
Speed PID K_d Filter	0,2 ms
Position PID K_p	0,03 erpm/rad
Position PID K_i	0 erpm/(rad*ms)
Position PID K_d	0,0004 erpm*ms/rad
Position PID K_d Process	0,0004 (erpm*ms)/rad
Position PID K_d Filter	0,2 ms
Ramp eRPMs per second	50000 erpm/s

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Sebastian Zimprich

Geburtsdatum: 02.06.1993

Staatsangehörigkeit: Deutsch

Familienstand: ledig

Bildungsgang

04/2016 – 08/2018 Masterstudium Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

10/2012 – 03/2016 Bachelorstudium Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Berufstätigkeit

08/2025 – heute Entwicklungsingenieur Befestigungstechnik bei der Adolf Würth GmbH & Co. KG

09/2018 – 09/2024 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)