

Akramullah Aminy

**Modellerstellung für die Rohrdekontamination
mittels hochfrequenter Schlagwirkung**

Karlsruhe 2014

Modellerstellung für die Rohrdekontamination mittels hochfrequenter Schlagwirkung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Akramullah Aminy

aus Kabul

Tag der mündlichen Prüfung: 30.07.2014

Referent: Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes

Korreferentin: Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova

Karlsruhe 2014

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herr Prof. Gentes veranlasste und betreute die vorliegende Arbeit. Ich danke Ihm für das mir entgegengebrachte Vertrauen, für die Unterstützung bei der Promotion und vor allem für die Motivation, die Arbeit fertigzustellen. Bei Frau Prof. Ovtcharova bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferats und die Begutachtung der Dissertation. Desweiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Schweizerhof für die Anregungen und kritischen Diskussionen, sowie Herrn Prof. Gehbauer und Herrn Prof. Geimer für die Teilnahme als Mitglieder in der Promotionskommission. Für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission bedanke ich mich außerdem bei Herrn Prof. Haghsheno.

Durch die tatkräftige Unterstützung der Werkstattmitarbeiter wurde diese Arbeit erst möglich, da dank Gesprächen wertvolle Ideen entstanden sind. Stellvertretend für die Mitarbeiter der Werkstatt möchte ich mich bei Herrn Armin Hofmann bedanken, der mir stets mit Rat und Tat und seinen kreativen Ideen zur Seite stand.

Ein besonders herzlicher Dank gilt meiner Familie für das mir entgegengebrachte Verständnis und ihre moralische Unterstützung. Auch meinen Freunden und Kollegen, die mich während der Zeit meiner Promotion begleitet haben, möchte ich meinen Dank aussprechen. Abschließend ist noch vielen anderen zu danken, die hier eingeschlossen sind.

Karlsruhe, Juni 2014

Akramullah Aminy

Kurzfassung

Die Bildung von schwer zu entfernenden Ablagerungen in Rohrleitungen führt zu sinkenden Förderleistungen und stellt somit ein wirtschaftliches Problem dar. Sind die Ablagerungen kontaminiert wie es in industriellen Anwendungen der Erdölindustrie der Fall ist, kommt verstärkend die Problematik der Umweltverträglichkeit von Abtragverfahren hinzu. Die bisher eingesetzten Verfahren zur Entfernung der Ablagerungen, wie zum Beispiel Hochdruckwasserstrahlverfahren, führen durch den Einsatz von Hilfsstoffen zu einer großen Menge an Sekundärabfällen, die kostenintensiv entsorgt werden müssen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Abtragverfahren für Rohrablagerungen entwickelt und qualifiziert. Dabei wurden ausgehend von einer Analyse des aktuellen Stands der Technik systematisch die unterschiedlichen Wirkprinzipien von Abtragverfahren analysiert und bewertet. Auf dieser Basis wurde ein Konzept für ein neues Schlagverfahren aufgestellt. Der Wirkmechanismus bei diesem Verfahren ist die Einbringung einer hochfrequenten Schlagwirkung mittels eines geometrisch bestimmten Werkzeugs. Durch die durch Schlagwirkung ausgelöste intensive Beanspruchung der Ablagerungen entstehen Risse in der Oberfläche, die zu einem Bruch und damit zu dem gewünschten Abtrag führen. Im Vergleich zu alternativen Abtragverfahren ist bei diesem Verfahren eine Entfernung von Rohrablagerungen ohne den Einsatz von Hilfsstoffen möglich, wodurch der Sekundärabfall auf ein Minimum reduziert wird.

Die Untersuchung des Schlagverfahrens wurde in einem entwickelten Versuchsstand durchgeführt. Es wurden dabei jeweils die Maximalkräfte der Schlagwirkung an der Rohraußenfläche mithilfe von Scherkraftsensoren gemessen und daraus die Schlagbeanspruchung des Rohrs hergeleitet. Durch die Auswertung der Messwerte mithilfe der deskriptiven Statistik konnte aufgezeigt werden, dass die hochdynamische Beanspruchung des Rohrs durch die komplexe Werkzeugbewegung auf der Grundlage einer Normalverteilung erfasst werden kann. Basierend darauf wurden systematisch die Wirkungen der Einflussfaktoren auf die Beanspruchung des Rohrs messtechnisch erfasst und mathematisch in einem Gesamtmodell beschrieben. Dieses Modell gibt in Abhängigkeit der werkzeug- und prozessbedingten Einflussfaktoren die Schlagbeanspruchung des Rohrs und damit der Ablagerungen wieder. Hierbei setzt sich die Beanspruchung aus unterschiedlichen Schlagintensitäten und den jeweiligen Schlaghäufigkeiten zusammen, die durch das Schlagwerkzeug auf das Rohr übertragen werden. Das Beanspruchungsmodell wurde daraufhin simuliert und die Wirkung der Einflussfaktoren für verschiedene Parameterkombinationen aufgezeigt.

Zur Untersuchung des Abtragverfahrens wurden mithilfe von Zementstein unterschiedliche Mischungen hergestellt, die dann in Rohre eingebracht wurden, um verschiedene Arten von

Ablagerungen nachzubilden. In Abtraguntersuchungen wurden die Wirkungen der Einflussfaktoren des Werkzeugs und des Prozesses aufgezeigt und die Effektivität des Verfahrens für schwer zu entfernende Ablagerungen demonstriert.

Abstract

The formation of persistent scales in pipes causes lower flow rates and therefore represents an economic problem. The contamination of scales - which usually is the case in most industrial applications - also poses a problem with respect to the scales' environmental compatibility. The currently applied techniques for the removal of these scales involve the use of auxiliary materials which accumulate large quantities of secondary waste that is costly to be disposed of.

In this research, an environmentally friendly removal method for tubing scales was developed and qualified. The analysis of the currently used technologies formed the basis for the analysis and systematic evaluation of different principles of removal action methods. Consequently, a concept for a new impact based removal method was established. The mechanism of this technique is the application of a high-frequency percussive action by a geometrically defined tool. The impact on the scales cracks their surface and causes their fracture and thus the detachment from the pipes. Compared to alternative removal methods this proposed technique works without any auxiliary material and thus prevents the production of secondary waste.

The investigation of the impact process was carried out in a newly developed test rig. In this test rig, the maximum forces of the percussive tool were measured with shear force sensors on the tubing surface and the resulting stress on the tube was obtained. The evaluation of the measured values using the method of descriptive statistics demonstrated that the high dynamic stress of the tubing due to the complex tool motion is based on a normal distribution. Based on this evaluation, the effects of the influencing factors on the stress of the tubings were systematically measured and outlined in a mathematical model. This model describes the dependency of the tool and the process of related factors that influences the tubing stress. According to this model, this stress is composed of the different impact intensities and frequencies which are transmitted by the percussive tool. The stress model was then simulated and the effects of the influencing factors were demonstrated for different parameters combinations.

For the investigation of the removal process through this new percussive technique, cement stone was used to simulate different types of scales inside tubings. The effects of the influencing factors of the tool and the process have finally been identified in extensive ablation studies where the effectiveness of the percussive technique for the removal of stubborn tubing scales is being demonstrated.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	III
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	4
2.1 Kontaminationen in Rohrleitungen	4
2.1.1 Entstehung kontaminierter Ablagerungen in Förderrohren	4
2.1.2 Ablagerungsarten	8
2.1.3 Ablagerungsdicke	10
2.1.4 Fazit zu den Eigenschaften von Rohrablagerungen	11
2.2 Verfahren für die Dekontamination von Rohrleitungen	12
2.2.1 Mechanische Verfahren mit Hilfsstoffen	13
2.2.2 Mechanische Verfahren ohne Hilfsstoffe	15
2.2.3 Chemische Verfahren	16
2.2.4 Thermische Verfahren	17
2.2.5 Fazit zu Dekontaminationsverfahren für Rohre	17
2.3 Grundlagen zum Bruch von spröden Materialien	18
2.3.1 Bruchmechanische Ursachen von Materialversagen	19
2.3.2 Eindringvorgang durch ein mechanisches Werkzeug	22
2.3.3 Wirkmechanismen beim Abtrag	29
2.3.4 Fazit zum Bruchverhalten spröder Stoffe	34
3 Problemabstraktion und Zielsetzung	36
3.1 Bewertung von Verfahrensprinzipien	36
3.2 Wirkprinzipien von Abtragverfahren	40
3.3 Auswahl eines Abtragverfahrens	43
3.4 Zielsetzung und weitere Vorgehensweise	46
4 Konzept für ein Abtragverfahren mittels Schlagbeanspruchung	48
4.1 Verfahrensbeschreibung mittels des C&C ² -Ansatzes	48
4.2 Entfernung der Rohrablagerungen durch Schlageinwirkung	51
4.2.1 Bewegungsgleichung des Werkzeugträgers	52
4.2.2 Werkzeugformen für die Erzeugung von Schlagbeanspruchungen	55
4.3 Gestaltung von Werkzeugträger und Werkzeug	59
4.3.1 Werkzeugträger und Bewegungsverhalten	59
4.3.2 Werkzeugformen	67

4.4	Transport und Einschluss der Ablagerungen	70
4.5	Fazit und Einflussfaktoren zum Schlagverfahren	72
5	Modellbildung des Beanspruchungszustandes	78
5.1	Versuchsstand, Versuchsplan und Randbedingungen	79
5.1.1	Versuchsstand und Messung der Schlagkraft	79
5.1.2	Versuchsplan und Randbedingungen	84
5.2	Methodik zur Erfassung des Beanspruchungszustandes	88
5.2.1	Datenanalyse zur Ermittlung der Schlagkraft	88
5.2.2	Ermittlung der Schlaganfangsbedingungen und Gesamtverlust	95
5.3	Experimentelle Untersuchungen und Modellbildung	104
5.3.1	Erfassung von Wirkungen der Einflussfaktoren	105
5.3.2	Mathematische Modellierung des Beanspruchungszustandes	122
5.4	Fazit zur Modellbildung der Beanspruchung	130
5.4.1	Überprüfung der Modellgüte	133
5.4.2	Möglichkeiten zur Beeinflussung der Beanspruchung	137
6	Experimentelle Untersuchung des Abtragverhaltens	141
6.1	Modellstoff, Versuchsstand, Methodik und Versuchsdurchführung	142
6.1.1	Kenngößen des Modellstoffs	142
6.1.2	Vorgehensweise beim Nachbilden von Rohrablagerungen	148
6.1.3	Versuchsstand zur Durchführung experimenteller Abtraguntersuchungen	149
6.1.4	Versuchsplan und Randbedingungen	151
6.2	Experimentelle Untersuchung des Abtragverhaltens	154
6.2.1	Einfluss der Ablagerungsdicke und Frequenz des Werkzeugträgers	154
6.2.2	Einfluss des Vorschubs	159
6.2.3	Einfluss der Härte der Ablagerungen	162
6.2.4	Einfluss des Abstands zwischen Werkzeug und Ablagerungen	165
6.2.5	Einfluss der Drehung des Werkzeugträgers	168
6.3	Fazit zur experimentellen Abtraguntersuchung	171
7	Zusammenfassung und Ausblick	174
7.1	Zusammenfassung	174
7.2	Ausblick	177
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis	VI
	Literaturverzeichnis	VIII
	Anhang	XIV

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Größe	Einheit
a	Risslänge	[mm]
a _c	Kritische Risslänge	[mm]
a _e	Eindringbreite des Werkzeugs im Material	[mm]
a _k	Mittelpunkt der Schlagintensitätsklasse	[-]
b	Eingriffslänge des Werkzeugs beim Eindringvorgang	[mm]
c	Konstante im Beanspruchungsmodell	[-]
d	Ablagerungsdicke	[mm]
d _A	Abstand	[mm]
d _a	Dämpfungskonstante	N·s/m
d _k	Abdruckdurchmesser	[mm]
e	Exzentrizität	[m]
e _e	Spezifisch elastische Verformung	[-]
e _p	Spezifisch plastische Verformung	[-]
f	Frequenz	[hz]
g	Gewichtskraft	[m/s ²]
h	Eindringtiefe	[mm]
h _K	Keilhöhe	[mm]
h _k	Relative Häufigkeit	[mm]
h _{max}	Maximaler Eindringtiefe	[mm]
h _p	Eindringtiefe nach Entlastung	[mm]
h _{max}	Maximale	[mm]
i	Schlagklasse	[-]
k _A	Federkonstante	[N/m]
k	Korrekturfaktor	[-]
j	Stoßzahl	[-]
k _{A1} , k _{A2} , k _σ , k _μ	Korrekturfaktor im Beanspruchungsmodell	[-]
l	Keillänge	[mm]
m	Masseverhältnis	[-]
m _d	Einflussstärke der Größe „Abstand“	[-]
m _{dσ}	Einflussstärke der Größe „Abstand“ in Faktor σ	[-]
m _{dA}	Einflussstärke der Größe „Abstand“ in Faktor A	[-]

m_f	Einflussstärke der Größe „Frequenz“	[-]
m_{fA}	Einflussstärke der Größe „Frequenz“ in Faktor A	[-]
$m_{f\sigma}$	Einflussstärke der Größe „Frequenz“ in Faktor σ	[-]
$m_{f\mu}$	Einflussstärke der Größe „Frequenz“ in Faktor μ	[-]
m_g	Gehäusemasse des Werkzeugträgers	[kg]
m_k	Einflussstärke der Größe „Keilanzahl“	[-]
m_{kA}	Konstante im Beanspruchungsmodell	[-]
$m_{k\sigma}$	Einflussstärke der Größe „Keilanzahl“ im Faktor σ	[-]
m_t	Einflussstärke der Größe „Zeit“	[-]
m_{tA}	Einflussstärke der Größe „Zeit“ in Faktor A	[-]
m_u	Masse der Unwucht	[kg]
n	Schlagzahl	[-]
n_{max}	Gesamtschlagzahl	[-]
n_0	Anzahl der Datenwerte	[-]
n_k	Absolute Häufigkeit	[-]
p	Wahrscheinlichkeitswert (Probability)	[-]
r	Radius	[mm]
r_a	Atomabstand	[Å]
t	Zeit	[s]
x	Laufvariable zur Beschreibung der Schlagintensität	[%]
x_d	Variable Abstand	[mm]
x_f	Variable Frequenz	[Hz]
x_k	Variable Keilanzahl	[-]
x_t	Variable Zeit	[s]
x_i	Prognosewert	[-]
y	Auslenkung	[m]
\dot{y}	Geschwindigkeit	[m/s]
\ddot{y}	Beschleunigung	[m/s ²]
A	Faktor der Beanspruchungsamplitude	[-]
B	Faktor im Beanspruchungsmodell	[-]
B_a	Mittlere Abweichung	[%]
C	Faktor im Beanspruchungsmodell	[-]
D	Kugeldurchmesser	[mm]

D_A	Außendurchmesser	[mm]
D_I	Innendurchmesser	[mm]
E	Elastizitätsmodul	[N/mm ²]
F	Kraft	[N]
F_e	Zentrifugalkraft	[N]
F_d	Dämpferkraft	[N]
F_k	Federkraft	[N]
F_{KS}	Stoßkraft während der Kompressionsperiode	[N]
F_{R1-4}	Resultierende Kraft an den Sensoren 1-4	[N]
F_{RS}	Stoßkraft während der Restitutionsperiode	[N]
F_{XS}	Seitenkraft	[N]
F_S	Schlagkraft	[N]
F_z	Trägheitskraft	[N]
F_{v1-4}	Vorspannkraft an den Sensoren 1 bis 4	[N]
K	Spannungsintensitätsfaktor	[N·mm ^{3/2}]
K_a	Keilanzahl	[-]
K_n	Klassenanzahl	[-]
K_{IC}	Bruchzähigkeit	[N·mm ^{3/2}]
R	Radius	[mm]
S	Schlagzahl	[-]
U	Umfang	[mm]
U_E	Eindringenergie eines Keils in einen spröden Stoff	[J]
α	Signifikanzniveau	[-]
α_k	Keilwinkel	[°]
β	Keilneigung	[°]
γ_0	Oberflächenenergie	[J/mm ²]
μ	Mittelwert, Erwartungswert	[-]
μ_0	Haftreibungskoeffizient	[-]
ν	Querkontraktionszahl	[.]
π	Kreiszahl Pi	[-]
σ	Standardabweichung	[-]
σ_{th}	theoretische Festigkeit	[N/mm ²]
σ_x	Normalspannung in x-Richtung	[N/mm ²]

σ_y	Normalspannung in y-Richtung	[N/mm ²]
σ_{Druck}	Druckfestigkeit	[N/mm ²]
σ_{Zug}	Zugfestigkeit	[N/mm ²]
τ_{xy}	Schubspannung	[N/mm ²]
φ	Drehwinkel	[°]
φ_n	Neigungswinkel	[°]
φ_r	Reibungswinkel	[°]
Ω	Erregerkreisfrequenz	[1/s]
\emptyset	Durchmesser	[mm]
Θ	Winkel zwischen Flanke des Werkzeugs und Oberfläche	[°]
AD-Test	Anderson-Darling Test (Anpassungstest)	
C&C ²	Contact & Channel Ansatz	
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit	
FFT	Fast Fourier Transformation	
HPWJ	High Pressure Water Jetting	
LSS	Leitstützstruktur	
NORM	Naturally-Occurring Radioactive Material	
QQ-Plot	Quantil-Quantil-Plot	
TENORM	Technologically-Enhanced, Naturally-Occurring Radioactive Material	
WF	Wirkfläche	
w/z-Wert	Wasserzement-Wert	
WZ	Werkzeug	
WFP	Wirkflächenpaar	

1 Einleitung

Rohrleitungen werden seit Jahrtausenden für den Transport von körnigen Feststoffen, Flüssigkeiten oder Gasen eingesetzt. Der sich dabei ergebende Volumenstrom durch den Rohrquerschnitt ist sowohl von dem Durchmesser als auch dem Druckunterschied zwischen Anfang und Ende des Rohrs abhängig. An der Kontaktstelle zwischen der Rohrrinnenwand und dem Transportmedium kommt es zu Reibungen, die sich in einem Druckverlust entlang des Rohrs zeigen und den Volumenstrom beeinflussen. Gelöste Stoffe im Fördermedium führen aufgrund des Transportvorgangs zu einer Ausfällung von Feststoffen, die sich im Laufe der Zeit an den Rohrrinnenflächen in Form von Ablagerungen absetzen und damit die Reibung an der Kontaktstelle erhöhen. Auf lange Sicht ist die Ausfällung und die Bildung von Ablagerungen in den Rohrrinnenflächen eine unvermeidbare Konsequenz des Stofftransports in einem Rohr.

Mit der Zeit wird dadurch der Rohrdurchmesser verengt und die Rauheit an der Kontaktstelle vergrößert. Infolgedessen steigt der Durchflusswiderstand an und die Transportgeschwindigkeit beziehungsweise die Förderleistung sinkt ab [Mal-06]. Die Verengung des Rohrquerschnitts kann im schlimmsten Fall zu einem vollständigen Abbruch des Transports durch Verstopfung führen [Ham-08]. Zusätzlich erhöhen Ablagerungen in Rohrleitungen die Beanspruchung des Rohrs, da sie eine erhöhte Anfälligkeit des Rohrwerkstoffs für Korrosion begünstigen [Bad-07]. Es sind daher Maßnahmen erforderlich, die die Förderleistung auf einem wirtschaftlich akzeptablen Niveau halten. Möglich ist beispielsweise die Zugabe von Inhibitoren zum Fördermedium, was eine Bildung von Ablagerungen verlangsamt, jedoch nie ganz verhindern kann. Des Weiteren kann der Druck in der Förderleitung energieintensiv erhöht werden, um dem Druckverlust durch die Ablagerungen entgegenzuwirken. Sind diese Maßnahmen nicht erfolgreich, kann eine Rohrreinigung oder der Austausch von Rohrleitungen erforderlich sein.

Die Entfernung der Ablagerungen aus der Rohrrinnenwand ist auch nach dem Einsatzende notwendig, wenn der Rohrwerkstoff in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden soll. Eine Herausforderung an die Rohrreinigung stellt dabei vor allem der Umstand dar, wenn die Ablagerungen kontaminiert sind und dadurch eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen. Die möglichen Kontaminationen sind vielfältig; sie können biologischer, chemischer oder radioaktiver Natur sein. Eine solche Kontamination wird vor allem dann zum Problem, wenn der Rückbau von Industrieanlagen, Kernkraftwerken oder Rohstoffförderanlagen fällig wird.. Rohrreinigungsmaßnahmen, die bei nicht kontaminierten Ablagerungen erfolgreich eingesetzt werden können, haben in diesen Fällen große Nachteile. Besonders der Einsatz von Strahlverfahren führt zu einer Vermischung der Hilfsstoffe mit den kontaminierten Ablagerungsrückständen. Dadurch steigt die Menge der zu entsorgenden Abfälle stark an. Es

besteht daher ein großes Potential für die Entwicklung neuer Verfahrenstechniken, die eine Entfernung von kontaminierten Rohrablagerungen ohne Sekundärabfall ermöglichen.

In der industriellen Rohstoffförderung sowie in der chemischen und verfahrenstechnischen Industrie ist die Problematik der kontaminierten Rohrablagerungen seit jeher bekannt. Zufriedenstellende Lösungen sind trotz des großen Ausmaßes bisher nicht verfügbar. Im Zuge des Ausstiegs aus der Kernenergie und dem damit verbundenen Rückbau kerntechnischer Anlagen gewinnt die Problematik der kontaminierten Ablagerungen zusätzlich an Bedeutung.



Abbildung 1: Rohre mit kontaminierten Ablagerungen aus der Erdgasförderung in Norddeutschland

Für die Entwicklung einer neuen Technik zur Entfernung der Ablagerungen sind Kenntnisse über ihre charakteristischen Eigenschaften notwendig. Diese sind wiederum von den Rahmenbedingungen abhängig, die bei der Entstehung der Ablagerungen eine Rolle spielen. Je nachdem, welche Stoffe ausgefällt werden, ändern sich die mechanischen Eigenschaften der Rohrablagerungen. Eine Herausforderung für die Dekontamination stellen dabei Ablagerungen dar, die aufgrund ihrer harten Konsistenz besondere Maßnahmen für die Entfernung aus der Rohrrinnenfläche erforderlich machen. Techniken, die hier eingesetzt werden, dürfen vor allem die Menge der zu entsorgenden Abfälle nicht vergrößern. Bestenfalls sollen die entfernten Ablagerungsrückstände anschließend direkt und ohne eine Nachbehandlung entsorgt sowie das Rohrmaterial in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden. Die Herangehensweise an die Problematik verlangt eine ganzheitliche Betrachtung, die sowohl den Entstehungsprozess der Ablagerungen mit berücksichtigt, als auch auf die Möglichkeiten zu deren Entfernung und die Entsorgung der Rückstände eingeht, damit eine nachhaltige Lösung für kontaminierte Rohrleitungen gefunden werden kann. In dieser Arbeit wird eine neue Dekontaminationstechnik entwickelt und so ein Beitrag zur Entfernung der Ablagerungen geleistet.

1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit ist die Untersuchung eines alternativen Wirkprinzips für das Abtragen von schwer zu entfernenden Ablagerungen. Hierzu soll ein Verfahren konzipiert werden, dessen Eignung in experimentellen Untersuchungen überprüft werden soll. Da es sich um ein neues Verfahren handelt, gilt es auch den tatsächlichen Wirkmechanismus des Abtragens zu analysieren und in ein Modell zu überführen. Die Herausforderung liegt dabei in der Entwicklung einer Methodik zur Erfassung der Beanspruchung des Rohrs unter den engen Bauraumrahmenbedingungen. Diese Beanspruchung stellt eine Größe dar, mit der die Effizienz des Verfahrens beurteilt werden kann. Dazu müssen zunächst die für das Verfahren charakteristischen Größen definiert und deren Wirkungen experimentell ermittelt werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in insgesamt sieben Kapitel. Auf die Einleitung folgen in Kapitel 2 die Grundlagen, die für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit die Basis bilden. Zunächst wird auf die Entstehung kontaminierter Rohrablagerungen eingegangen und ein Überblick über den Stand der Technik im Hinblick auf Rohrdekontaminationen gegeben. Dabei werden mechanische Abtragverfahren besonders detailliert erläutert, indem auch die bruchmechanischen Grundlagen für den Abtrag von spröden Stoffen vorgestellt werden. In Kapitel 3 erfolgen dann eine Problemanalyse sowie eine detaillierte Definition der Zielsetzung. Es soll ein rein mechanisches Abtragverfahren entwickelt werden und sowohl die Eignung als auch die Wirkungsweise demonstriert werden. Anschließend wird in Kapitel 4 ein Konzept für ein neues Abtragverfahren mittels Schlagwirkung entworfen. Die Beanspruchung des Rohrs durch dieses Abtragverfahren wird danach in Kapitel 5 in einem mathematischen Modell zusammengefasst. Des Weiteren wird die Beanspruchung in einem Simulationsmodell wiedergegeben, die Modellgüte überprüft und es werden verschiedene Möglichkeiten zur Beeinflussung der Beanspruchung durch die Einflussfaktoren aufgezeigt. Im vorletzten Kapitel werden unter verschiedenen Randbedingungen experimentelle Abtraguntersuchungen durchgeführt, um die Effektivität des Verfahrens zu zeigen. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse resümiert und ein Ausblick für weitere mögliche Untersuchungen gegeben.

2 Grundlagen

Die Qualifizierung eines neuen Abtragverfahrens für die Entfernung von Ablagerungen aus Rohren erfordert zunächst die genaue Problemdefinition. Hierzu wird auf den Entstehungsvorgang der Ablagerungen eingegangen sowie die charakterisierenden Größen der Ablagerungen vorgestellt. Die bisher zum Einsatz kommenden Techniken zur Entfernung von Ablagerungen aus Rohren können nach ihren Verfahrensprinzipien eingeteilt werden. Exemplarisch werden dazu im Verlauf dieses Kapitels verschiedene Verfahren vorgestellt. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Schlagverfahren basiert auf der mechanischen Zertrümmerung der Ablagerungen durch die Einbringung einer hochfrequenten und definierten Kraft. Für das Verständnis des Abtragmechanismus sind bruchmechanische Grundlagen von spröden Stoffen erforderlich, auf die am Ende dieses Kapitels näher eingegangen wird.

2.1 Kontaminationen in Rohrleitungen

Kontaminierte Rohrleitungen sind in vielen Industriebereichen vorhanden. In den vorwiegenden Fällen handelt es sich um spröde und fest anhaftende Ablagerungen an der Rohrwand, die in unterschiedlichen Ausführungen vorkommen können. Im folgenden Abschnitt wird die Entstehung dieser Ablagerungen am Beispiel radioaktiv kontaminierter Ablagerungen aus der Erdgas- und Erdölförderung vorgestellt und auf die Charakterisierung dieser Ablagerungen anhand verschiedener Merkmale eingegangen.

2.1.1 Entstehung kontaminierter Ablagerungen in Förderrohren

Die Bildung von Ablagerungen (engl.: scales) in Erdöl-/Erdgasrohren ist auf den Einsatz großer Wassermengen während des Förderprozesses zurückzuführen. Das Injizieren von Wasser in die Förderstelle dient zur Erhöhung des mit der Zeit abfallenden Förderdrucks. Oftmals wird hierzu Meerwasser eingesetzt. Kommt dieses mit Salzen angereicherte Wasser mit mineralhaltigen Flüssigkeiten aus den Lagerstätten in Berührung, so treten chemische Vorgänge auf, die der Fällungskristallisation zugeordnet werden können [Smi-92]. Das Vermischen von Meerwasser und Lagerstättenflüssigkeiten führt zu einer Bildung von Feststoffen [Cra-99]. Feststoffe können auch gebildet werden, wenn das Löslichkeitsprodukt der geförderten Flüssigkeit herabgesetzt wird und damit eine übersättigte Lösung vorliegt. Diese bei der Förderung von Flüssigkeit aus den tiefen Gesteinsschichten entstehende Lösung bildet sich aufgrund sich ändernder Umgebungsbedingungen wie dem Druck in der Leitung und dem pH-Wert sowie der Temperatur der Flüssigkeit [Ham-08] [Bad-07]. Die Größen ändern sich fortdauernd beim Transport von verschiedenen Flüssigkeiten durch die Rohrleitungen und insbesondere dann, wenn die

Förderung aus der tiefen Gesteinsschicht bis zur Erdoberfläche erfolgt. Es kommt dabei zu einer kontinuierlichen Ausfällung von Feststoffen aus der flüssigen Phase.

Die Fällungskristallisation, die letztendlich die Ursache für die Bildung der Ablagerungen ist, beginnt mit Keimbildungsvorgängen in der Förderflüssigkeit. Grundsätzlich können zwei Arten von Keimbildungen unterschieden werden. Die primäre Keimbildung führt zur Entstehung von Feststoffen in Form von Kristallen aufgrund eines thermodynamischen Ungleichgewichts in der Förderflüssigkeit, die durch eine übersättigte Lösung gegeben ist. Dagegen liegt die Ursache bei der sekundären Keimbildung in einer hydrodynamischen und mechanischen Beanspruchung existierender Kristalle, deren Bruchstücke als Keime wirken können. Nach [Kuc-08] spielt bei der Fällungskristallisation die sekundäre Keimbildung eine untergeordnete Rolle. Der Hauptanteil der entstehenden Kristalle ist daher auf den primären Keimbildungsmechanismus zurückzuführen. Dieser teilt sich in die homogene und heterogene Keimbildung auf [Cra-99] [Kuc-08]. Bei der homogenen Keimbildung verbinden sich die in den übersättigten Lösungen vorhandenen Ionen-Paare zu Kristallen. So können sich die im Meerwasser vorkommenden Sulfationen mit den Calcium-, Barium- und Strontiumionen des Lagerstättenwassers verbinden [Bad-07]. Hierbei bilden sich Calcium¹-, Barium²-, Strontiumsulfate³ sowie Calciumcarbonate⁴. Diese Stoffe stellen den Hauptbestandteil der Ablagerungen dar, die bei der Förderung von Erdgas und Erdöl auftreten. Daneben kann es auch zur Bildung von kleineren Mengen Eisenoxid-, Eisensulfid- und Eisencarbonatverbindungen kommen [Bad-07] [Ham-08]. Die Menge der ausgefällten Stoffe hängt von der Konzentration der Kationen und Ionen in der Förderflüssigkeit sowie von den Umgebungsbedingungen ab. Die Konzentration kann in Abhängigkeit der Lagerstätten variieren und gibt damit den Ablagerungen eine von der Förderstelle abhängige Eigenschaft.

Bei der heterogenen Keimbildung tritt die Kristallisation an Fremdpartikeln in der Förderflüssigkeit oder auch an Imperfektionen wie der Oberflächenrauigkeit von Rohren auf. Beide Keimbildungsvorgänge laufen parallel ab [Kuc-08]. Bei kleiner Übersättigung dominiert der heterogene Keimbildungsmechanismus, während bei hoher Übersättigung die homogene Keimbildung hauptsächlich für die Entstehung neuer Keime verantwortlich ist. Sind die gebildeten Keime im thermodynamischen Sinne stabil, so kann ein Kristallwachstum stattfinden und durch die Anlagerung von weiteren Bausteinen größere Strukturen formen, die schließlich

¹Calciumsulfat (Mineralogische Bezeichnung: Anhydrit, ugs. Gips)

²Bariumsulfat (Mineralogische Bezeichnung: Baryt, ugs. Schwerspat)

³Strontiumsulfat (Mineralogische Bezeichnung: Coelestin)

⁴Calciumcarbonat (Mineralogische Bezeichnung: Calcit beziehungsweise Aragonit, ugs. Kalk)

zur Bildung der Ablagerungen an den zur Verfügung stehenden Oberflächen wie beispielsweise der Rohrinnefläche führen.

Die Ursache für die Kontamination dieser Ablagerungen sind die natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffe (engl.: Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)) in den tiefen Gesteinsschichten. Der Förderprozess und der Einsatz von großen Wassermengen führen zu einer Mobilisierung dieser NORM-Stoffe und einem ungewollten Abtransport zusammen mit der Förderflüssigkeit. Dabei stellt die Hauptursache für die radioaktive Kontamination das Radionuklid Radium aus der Gruppe der Erdalkalimetalle dar. Beim Transport kommt es aufgrund des Vorkommens von Sulfationen in der Förderflüssigkeit zu ähnlich ablaufenden Keimbildungsvorgängen, die dann zur Bildung des radioaktiven Radiumsulfats führen. Daneben kann es nach Reichelt [Rei-04] durch Bariumionen in der Förderflüssigkeit auch zu einer verstärkten Ausfällung von Radiobaryt kommen. Im Laufe der Zeit lagern sich diese Stoffe an der Rohrinnefläche ab und bilden schwer zu entfernende Inkrustationen aus.

Die zwei am häufigsten vorkommenden Radium-Isotope bei der Kontamination der Ablagerungen sind das Radium R-226 und R-228. Bei beiden Isotopen handelt es sich um Zerfallsprodukte von Uran U-238 beziehungsweise Thorium Th-232. Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, können diese Stoffe weiter zerfallen und damit zur Kontamination der Ablagerungen durch weitere Stoffe beitragen. In der mit der Zeit anwachsenden Ablagerungsschicht kommt es daher zu einer unabsichtlichen Anreicherung radioaktiver Stoffe, die auch unter der Bezeichnung TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material) bekannt ist. Die Konzentration der natürlichen Radionuklide ist dabei so hoch, dass die Aktivität oberhalb der natürlichen Hintergrundstrahlung liegt [Bog-07]. Neben den radioaktiven Stoffen kann es auch zur Einlagerung weiterer Schadstoffe wie zum Beispiel der Schwermetalle Quecksilber und Blei kommen [Gel-06]. Die Problematik der kontaminierten Rohrablagerungen aus der Förderung von Erdgas und Erdöl ist bereits seit über 100 Jahren bekannt. Erste Messungen zur Erfassung der Aktivitäten der geförderten Flüssigkeiten⁵ aus den tiefen Gesteinsschichten wurden 1927 in Russland durchgeführt und haben eine durchschnittliche Aktivität von 250 Bq/l ergeben. Untersuchungen an trockenen Rohrablagerungen aus Förderquellen in Norddeutschland aus dem Jahr 1985 haben in Einzelfällen Aktivitäten von bis zu 1000 Bq/g gezeigt [Kol-85]. Die zum Vergleich von der Strahlenschutzverordnung festgelegte Freigrenze für Stoffe zur Entlassung aus der

⁵Hierbei handelt es sich um NORM enthaltenes Lagerstättenwasser, das bei der Förderung anfällt. (engl.: produced water oder formation water)

Überwachung liegt bei 0,2 Bq/g. Da die Aktivitäten der Rückstände aus der Erdgas- und Erdölförderung in der Regel diese Grenze bei Weitem überschreiten, gelten diese Stoffe generell als überwachungsbedürftige Stoffe im Sinne der Strahlenschutzverordnung [Str-01]. Kontaminationen dieser Art stellen ein Sicherheitsrisiko für Mensch und Umwelt dar und erschweren den Umgang mit den Hinterlassenschaften aus der Förderung fossiler Energieressourcen.

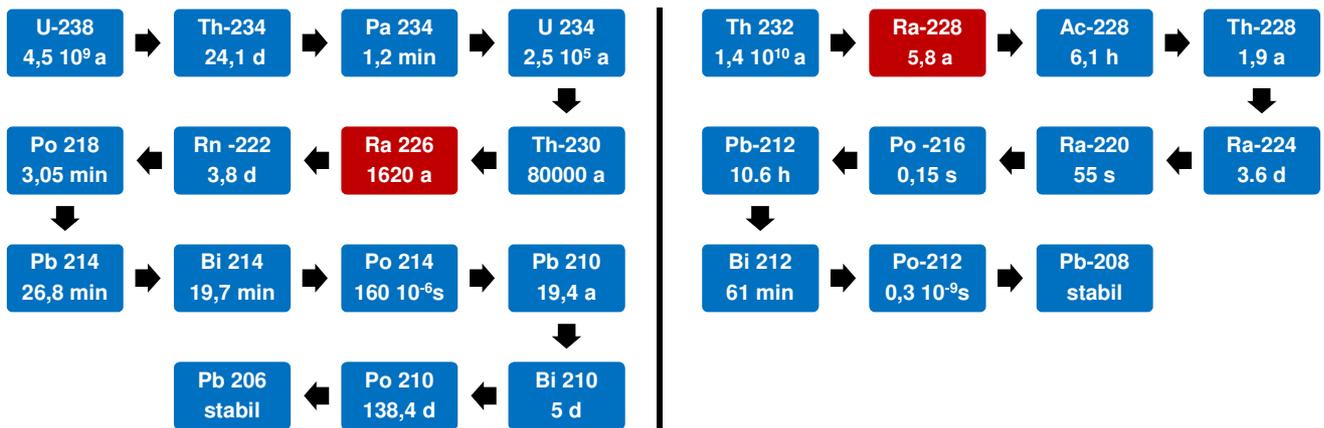


Abbildung 2: Zerfallskette von Uran 238 (links) und Thorium 232 (rechts) [Smi-92] [Amb-12]

Das Vorkommen von TENORM-Kontaminationen ist nachweisbar in geförderten Flüssigkeiten, in großen Mengen anfallenden Schlämmen und in Ablagerungen der Fördereinrichtungen. Diese Kontaminationen führen dazu, dass Dekontaminationsmaßnahmen an Förder- und Verarbeitungsgerätschaften spätestens dann durchgeführt werden müssen, wenn die Förderquelle versiegt oder die nutzbare Einsatzdauer der Gerätschaften erreicht ist. Aus der Literatur sind zahlreiche Untersuchungen zur Erfassung der Aktivitäten der Hinterlassenschaften aus der Erdgas- und Erdölförderung bekannt. Die Untersuchungen zeigen, dass die Aktivitäten großen Streuungen unterlegen sind. Untersuchungen, die im Auftrag des heutigen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) durchgeführt wurden, haben die in Tabelle 1 aufgeführten Aktivitätswerte für die NORM-Rückstände ergeben. Diese Untersuchungen decken sich mit weiteren Untersuchungen, die weltweit durchgeführt wurden. Demnach sind in der Regel bei den Rohrablagerungen die größten Aktivitäten zu erwarten. Hingegen ist bei anderen Hinterlassenschaften wie zum Beispiel den Schlämmen die Aktivitätskonzentration wegen der größeren Maße gering [Gel-03]. Aufgrund des starken Vorkommens von Radium-Isotopen treten vorwiegend Alpha-Strahlungen auf.

Tabelle 1: Spezifische Aktivität von Rückständen aus der Erdöl-/ Erdgasförderung gemäß [Gel-03]

Norm-Rückstände	Spezifische Aktivitäten	
Produktionsschlämme	30 %	50 – 100 Bq/g
	20 %	20 – 50 Bq/g
	50 %	< 20 Bq/g
Trockene, reine Scales (Rohrablagerungen)	Mittelwert	100 – 200 Bq/g
	Maximum	400 – 920 Bq/g

Die Geschwindigkeit der Feststoffbildung aus der Förderflüssigkeit ist sehr unterschiedlich. So sind Fälle bekannt, die innerhalb von wenigen Stunden zu einem kompletten Erliegen der Förderleistung aufgrund einer starken Bildung von Ablagerungen in den Rohrleitungen geführt haben [Kel-09]. In der Regel bilden sich die Rohrablagerungen über Jahre, wodurch die Problematik erst dann zum Vorschein kommt, wenn die Förderquelle versiegt ist und der Rückbau der Fördereinrichtung feststeht. Nach Gellermann [Gel-03] beträgt das zu erwartende Ausmaß von kontaminierten Rohrleitungen aus der Erdgas- und Erdölförderung alleine in Deutschland in den nächsten Jahren über 600 km. Weltweit gesehen bilden diese nur eine kleine Menge der kontaminierten Rohleitungen und stellen die führenden Länder in der Erdgas- und Erdölproduktion vor eine große Herausforderung. Techniken, die zur Dekontamination dieser Anlagen eingesetzt werden, müssen der Kontaminationen eine für die Sicherheit von Menschen und Umwelt schonende Lösung anbieten.

2.1.2 Ablagerungsarten

Es existieren verschiedene Techniken mit dem Ziel, den Zusammenhalt der Ablagerungen untereinander zu zerstören und damit einen Abtrag der Ablagerungen zu ermöglichen. Für den Einsatz einer passenden Technik sind Informationen über den Aufbau und die Eigenschaften der Ablagerungen von Bedeutung. Im Folgenden werden daher einige relevante Charakteristika der Ablagerungen aufgezählt. Die hierfür wichtigsten Eigenschaften sind vor allem mechanische Kenngrößen der Ablagerungen. In der Regel werden solche Größen mithilfe von experimentellen Untersuchungen an definierten Probekörpern und unter gleichen Randbedingungen durchgeführt. Aufgrund der Dicke der Ablagerungen von wenigen Millimetern sind solche Kenngrößen schwierig zu ermitteln und daher aus der Literatur bisher nicht bekannt. Chemische Analysen, die nicht an die Probengeometrie gebunden sind, geben Aussagen über die Zusammensetzung und den Aufbau der Ablagerungen sowie über die vorkommenden Elemente. Damit kann auf die mineralogische Zusammensetzung der Ablagerungen geschlossen und die gesuchten mechanischen Kenngrößen können abgeleitet werden. Im Folgenden wird auf die

Zusammensetzung der Ablagerungen näher eingegangen, um daraus die Eigenschaften der Ablagerungen bestimmen zu können. Der Großteil der Rohrablagerungen aus der Literaturrecherche lässt sich in die im Folgenden genannten Gruppen einteilen.

2.1.2.1 Calciumcarbonathaltige Ablagerungen

Calciumcarbonathaltige Ablagerungen bestehen aus den chemischen Elementen Calcium, Kohlenstoff und Sauerstoff. Die chemische Formel für Calciumcarbonat lautet CaCO_3 . Wie oben bereits beschrieben, tritt Calciumcarbonat in den Modifikationen Calcit und Aragonit auf. Diese Art von Ablagerung ist aus dem nicht industriellen Bereich bekannt und sorgt für eine „Verkalkung“ von wasserführenden Rohren. Calcit beziehungsweise Kalkspat besitzt eine Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ und gehört mit der Mohs'schen Härte von 3 zu den „weichen“ Mineralien. Aragonit ist etwas härter und dichter gepackt. Die Härte beträgt bei diesem Mineral 3 bis 4 nach Mohs und die Dichte $2,95 \text{ g/cm}^3$ [Mar-08]. Calciumcarbonathaltige Ablagerungen lassen sich gut mit chemischen Verfahren wie zum Beispiel Säuren lösen und stellen in der Regel keine großen Herausforderungen in Bezug auf das Entfernen dar.

2.1.2.2 Sulfathaltige Ablagerungen

Bariumsulfathaltige Ablagerungen in Förderrohren gehören zu den am häufigsten vorkommenden Ablagerungen und sind eine große Herausforderung für gängige Reinigungsverfahren [Bad-07] [Tom-03]. Bariumsulfat kommt in der Natur in der Form von Baryt beziehungsweise Schwerspat mit der chemischen Formel BaSO_4 vor und besitzt eine Dichte von $4,5 \text{ g/cm}^3$. Die hohe Dichte und die geringe Porosität bedingt eine große Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Reinigungsverfahren. Die gängige Technik zur Entfernung dieser Ablagerungen stellen mechanische Verfahren dar. Die Härte nach Mohs beträgt 3 bis 3,5 [Rob-74].

Eine weitere Form sulfathaltiger Ablagerungen stellt das Calciumsulfat oder umgangssprachlich auch Gips genannt dar. Das weiche Mineral mit der chemischen Formel $\text{Ca} [\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ besitzt die Härte von 2 nach Mohs und eine Dichte von $2,4 \text{ g/cm}^3$. Das Mineral Anhydrit, eine weitere Form von Calciumsulfat, besitzt eine größere Härte nach Mohs von 3 bis 3,5 sowie eine größere Dichte von $2,9 \text{ g/cm}^3$

Strontiumsulfat oder auch Coelestin als Mineralform genannt, stellt eine weitere Art sulfathaltiger Ablagerungen in Förderrohren dar. Strontiumsulfat kann zusammen mit Bariumsulfat ausgefällt werden und besitzt ähnliche mechanische Eigenschaften. Coelestin besitzt die Härte 3 bis 3,5 nach Mohs sowie ein Dichte von $3,9 \text{ g/cm}^3$

2.1.2.3 Sulfidhaltige Ablagerungen

In der Regel kommen sulfidhaltige Ablagerungen im Vergleich zu sulfat- und carbonathaltigen Ablagerungen sehr selten vor. Nach Kelland [Kel-09] sind die am meisten vorkommenden Sulfidablagerungen Eisen(II)-sulfid-, Zink(II)-sulfid- und Blei(II)-sulfid-Verbindungen. Eisensulfidhaltige Ablagerungen entstehen durch die Reaktion von korrodiertem Eisen mit Hydrogensulfat, das durch sulfatreduzierende Bakterien erzeugt wird. Eisensulfid kommt in unterschiedlichen Mineralformen vor. Eine mögliche Form ist das Mineral Pyrrhotin, das umgangssprachlich als Magnetkies bekannt ist. Dieses besitzt die Härte 4 nach Mohs und eine Dichte von $4,7 \text{ g/cm}^3$. Noch seltener als Eisensulfidablagerungen sind nach Badr [Bad-07] Zink- und Bleisulfidablagerungen. Die Mineralform von Zinksulfid ist Sphalerit. Dieses besitzt nach Roberts [Rob-74] eine Dichte von $3,9$ bis $4,1 \text{ g/cm}^3$ sowie eine Härte von 3 bis 4 nach Mohs. Bleisulfid, auch Galenit genannt, besitzt eine hohe Dichte von $7,5 \text{ g/cm}^3$, jedoch eine kleine Mohs'sche Härte von 2,5 bis 3 [Mar-08].

2.1.2.4 Natriumchloridhaltige Ablagerungen

Manche Lagerstättenwasser können große Mengen des leichtlöslichen Natriumchlorids beinhalten. Vor allem eine abfallende Temperatur bedingt eine schnelle Ausfällung dieses Salzes, sodass Rohrleitungen innerhalb kürzester Zeit blockiert werden können. Bei der sich bildenden Mineralform handelt es sich um Halit, besser bekannt als Steinsalz. Halit besitzt eine relativ kleine Mohs'sche Härte von 2 sowie eine Dichte von $2,1 \text{ g/cm}^3$.

2.1.3 Ablagerungsdicke

Neben den oben genannten charakteristischen Werten wie Dichte und Härte ist die Dicke der Ablagerungen eine weitere wichtige Kenngröße. Bei der Bildung der Ablagerungsdicke spielt die Einsatzdauer des Rohrs eine maßgebende Rolle. Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die bei Rückbaumaßnahmen von Anlagen anfallenden Rohrleitungen mehrere Jahre im Einsatz gewesen sind und damit eine Ablagerungsschicht besitzen. Die Dicke dieser Ablagerungen kann einige Millimeter betragen. Rohrleitungen, die aufgrund von Produktionsausfällen gewechselt werden müssen, können hingegen Ablagerungsdicken von einigen Zentimetern aufweisen oder komplett blockiert sein [Cra-99]. Untersuchungen zur Ermittlung der Ablagerungsdicke an einer Erdgasfördersonde der Länge 5 km haben nach Gelermann [Gel-06] aufgezeigt, dass sich die Ablagerungsdicke in Abhängigkeit der Tiefe der Fördersonde verändert. Es ist daher davon auszugehen, dass innerhalb eines Rohrleitungsnetzes nicht nur die Zusammensetzung der Ablagerungen eine andere ist, sondern auch die Ablagerungsdicke großen Schwankungen unterworfen ist. In der nachfolgenden

Abbildung 3 ist der Verlauf der Dicke und auch die Änderung der Dichte in Abhängigkeit der Tiefe der Bohrung dargestellt. Tendenziell nimmt bei diesem Beispiel die Dicke mit der Tiefe der Bohrung zu, während die Dichte annähernd konstant bleibt.

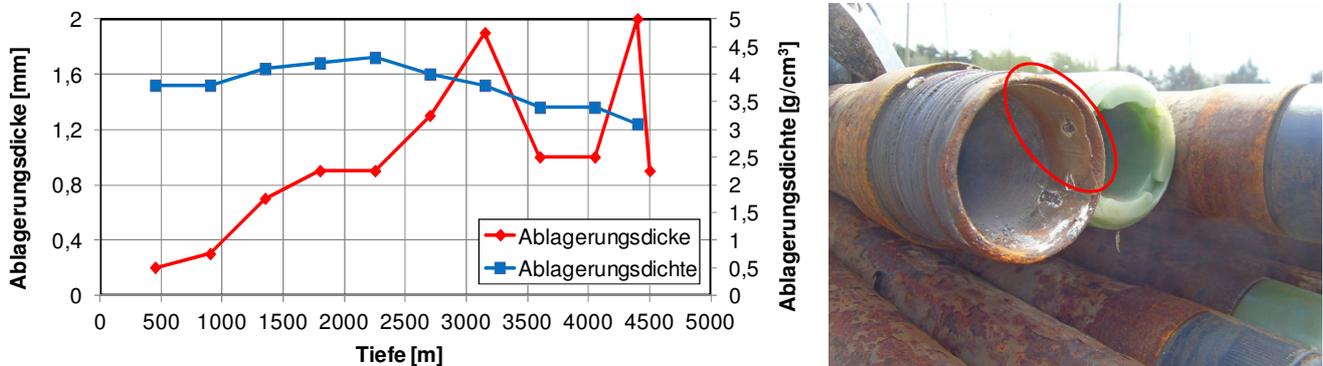


Abbildung 3: Verlauf der Ablagerungsdicke und Ablagerungsdichte in Abhängigkeit der Sondentiefe gemäß [Gel-06] und Bild einer kontaminierten Ablagerungsschicht aus einer Förderstelle für Erdgas in Norddeutschland

Bei einer üblichen Einzelrohrlänge von 10 bis 12 m kann jedoch davon ausgegangen werden, dass innerhalb eines Rohrstücks die Ablagerungsdicke und die Zusammensetzung annähernd konstant bleiben. Die aus der Literatur angegebenen Dicken unterliegen unterschiedlichen Schwankungen. In der Regel kann mit einer Ablagerungsdicke zwischen 1 und 3 mm in Förderrohren der Erdöl- und Erdgasförderung gerechnet werden.

2.1.4 Fazit zu den Eigenschaften von Rohrablagerungen

Die Zusammensetzung der Ablagerungen ist größtenteils durch Salze verschiedener Stoffe gegeben, die sich als Ursache einer Fällungsreaktion im Transportmedium bilden. Diese Salze bestimmen im Wesentlichen die Eigenschaften der Ablagerungen. Die unabsichtliche Mobilisierung von Radionukliden aus der Förderquelle führt zwar zu einer Kontamination der Ablagerungen, verändert jedoch aufgrund ihrer geringen Konzentration nicht deren mechanische Eigenschaften. Im weiteren Verlauf der Arbeit kann daher der Fokus auf die mechanischen Kennwerte gelegt und die Kontaminationen vernachlässigt werden. Mit dieser Annahme kann ein Modellstoff gesucht werden, der die wesentlichen Eigenschaften der Ablagerungen nachbildet, sodass die Untersuchung des Abtragverhaltens unter wesentlich einfacheren Randbedingungen im Labor durchgeführt werden kann. Das Problem der kontaminierten Ablagerungen kann damit auf ein rein mechanisches Problem zur Entfernung von Ablagerungen reduziert werden. Nichtsdestotrotz ist es erforderlich, dass die im Folgenden untersuchten Abtragverfahren aufgrund der Kontaminationen auch unter den Gesichtspunkten der Sicherheit für Mensch und Umwelt bewertet werden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird in Kapitel 6 ein passender Modellstoff ausgewählt, mit dem die Ablagerungen im Rohrrinneren nachgebildet werden. Das Nachbilden der Ablagerungen hat zum Ziel, Ablagerungen mit vorgegebenen Kennwerten zu erhalten und das Abtragverfahren daran zu untersuchen. Da die Ablagerungen in unterschiedlicher Härte, Dichte und Dicke vorkommen, sollte der Modellstoff möglichst einen geeigneten Bereich innerhalb dieser Kennwerte abdecken, sodass ein großer Teil der Ablagerungen berücksichtigt werden kann. Durch die Nachbildung der Ablagerungen wird ermöglicht, dass die Abtraguntersuchungen unter jeweils definierten Randbedingungen reproduzierbar und statistisch abgesichert durchgeführt werden können. Im Folgenden werden die derzeit vorhandenen Verfahren für die Dekontamination von Rohrleitungen vorgestellt.

2.2 Verfahren für die Dekontamination von Rohrleitungen

Dekontaminationsverfahren müssen gewisse Randbedingungen erfüllen, damit sie von dem Anwender aus der Industrie eingesetzt werden. Die Effektivität des Verfahrens spielt dabei die zentrale Rolle. Aus Sicht des Strahlenschutzes müssen die gesetzlich vorgeschriebenen Freigrenzen eingehalten werden, damit eine radioaktive Kontamination aus der strahlenschutztechnischen Überwachung entlassen werden kann. Da es sich bei den Kontaminationen aus dem Bereich der Erdöl- und Erdgasförderung um eine schwach radioaktive Kontamination handelt, liegt aus radiologischen Gesichtspunkten keine Aktivierung des Stahlwerkstoffs vor. Die restlose Entfernung der Ablagerungen bedeutet somit die vollständige Dekontamination des Rohrs, da die Kontaminationen nur in den Ablagerungen vorhanden sind. Die Überprüfung einer erfolgreich durchgeführten Rohrdekontamination erfolgt daher in der Praxis anhand einer rein visuellen beziehungsweise optischen Inspektion. Dabei gilt ein Rohr als dekontaminiert, wenn eine restlose Entfernung der Ablagerungen aus den Rohrrinnenflächen zu erkennen ist.

Für eine effektive und wirtschaftliche Dekontamination eines Rohrs ist die Auswahl eines geeigneten Verfahrens, angepasst an die Eigenschaft der Ablagerungen, entscheidend. Die Vielzahl der existierenden Reinigungsverfahren und Techniken lassen sich auf wenige Verfahrensprinzipien zurückführen. Nach Bach [Bac-03] können Abtragverfahren anhand von drei verschiedenen Prinzipien unterschieden werden. Demnach basieren Verfahren entweder auf chemischer/elektrochemischer, mechanischer oder auf thermischer Basis. Im Folgenden wird eine Klassifizierung der bisher eingesetzten Verfahren für die Rohrdekontamination nach diesen Verfahrensprinzipien vorgenommen und auf die Besonderheiten näher eingegangen. Die mechanischen Verfahren werden des Weiteren in „Verfahren mit Hilfsstoffen“ und „mechanische

Verfahren ohne Hilfsstoffe“ unterteilt. Damit wird zusätzlich eine Unterscheidung nach dem Auftreten von Sekundärabfall vorgenommen.

2.2.1 Mechanische Verfahren mit Hilfsstoffen

Den einfachsten Fall einer Reinigung von Rohrleitungen stellt die hydromechanische Technik des Ausspülens dar, die aus der konventionellen Rohrreinigung bekannt ist. Das mehrmalige Durchspülen der Leitungen mithilfe von Wasser und einer Fließgeschwindigkeit zwischen 2 und 3 m/s führt zum Herauslösen von losen Verunreinigungen und Anhaftungen. Das Ausspülen der Rohre kommt vorwiegend zum Einsatz, um Trübungen und damit Qualitätsbeeinträchtigungen durch Braun- und Rostwasser in trinkwasserführenden Leitungen entgegenzuwirken [Dvg-10]. Bei stärker anhaftenden Ablagerungen kann durch die Erhöhung der Fließgeschwindigkeit die Abtragleistung verbessert werden. Hierzu werden nach dem Prinzip der Kavitation durch die zusätzliche Beimengung von Druckluft beim Ausspülvorgang Luftblasen erzeugt, die beim Zusammenfallen zu lokal hohen Fließgeschwindigkeiten des Wassers führen. Dadurch kann nicht nur die Reinigungswirkung verbessert, sondern gleichzeitig auch der hohe Wasserverbrauch, der bei diesem Verfahrensprinzip immer gegeben ist, reduziert werden [Kle-10]. Im kerntechnischen Bereich liegt häufig eine Kontamination der dünnen Oxidschicht des Stahlwerkstoffs vor. In diesem Fall werden zusätzlich Chemikalien eingesetzt, die beim Durchspülen der Rohrleitungen neben dem mechanischen Abtrag eine chemische Entfernung der Oxidschicht ermöglichen.

Um das Spülverfahren aus der konventionellen Rohrreinigung für hartnäckigere Ablagerungen wie diejenigen aus dem Bereich der Erdöl- und Erdgasförderung einzusetzen, bedarf es einer wesentlich höheren Fließgeschwindigkeit des eingesetzten Mediums. Beim Hochdruckwasserstrahlverfahren (engl.: HPWJ) werden Lanzen mit Düsen benutzt, bei denen das Fluid unter einem Druck von mehreren 100 bar aus der Düse herausströmt. Das Zerstören und das Herauslösen der Ablagerungen geschehen dabei durch die Übertragung der kinetischen Energie des Fluids auf die Ablagerungsoberfläche, sodass der Abtrag durch die Impulswirkung der auftreffenden Flüssigkeit zustande kommt. Das Hochdruckwasserstrahlverfahren wird bei der Reinigung von Erdöl- und Erdgasrohrleitungen standardmäßig eingesetzt. Der hierfür erforderliche Druck zur Entfernung der Ablagerungen liegt in der Regel über 2000 bar [Var-10]. Nach [Bac-03] hängt die Menge des anfallenden Sekundärabfalls stark davon ab, ob das Wasser rezykliert werden kann. Um gute Standzeiten für Düsen und Dichtungskomponenten zu bekommen, ist die Anforderung an die Wasserqualität sehr hoch. Um das verunreinigte Wasser wieder einzusetzen, ist eine energieintensive Reinigung durch mehrstufige Filtersysteme notwendig.

Durch den Zusatz von Strahlmitteln in Form von Abrasivstoffen in dem Fluidstrom kann die Abtragleistung weiter verbessert werden. Dabei wirkt neben dem Aufprallmechanismus des Strahlmittels die Abrasivität des eingesetzten Strahlmittels abtragfördernd. Als Abrasivmittel werden hauptsächlich mineralische Stoffe großer Härte wie Quarzsand, Granat und Korund eingesetzt [Wes-10]. Die hierbei eingeleitete Energie in das abzutragende Material führt zu Rissen und Spannungen im Gefüge und zu einem allmählichen Bruch des Abtragguts. Bei falschem Einsatz der Technik kann eine Abrasion der Rohrinnefläche stattfinden.



Abbildung 4: Dekontamination von Rohren mittels Hochdruckwasserstrahlverfahren [Var-10]

Das Strahlverfahren kann auch ohne ein Trägerfluid durchgeführt werden. Sowohl beim nassen als auch beim trockenen Strahlverfahren kann das eingesetzte Strahlmittel nur beschränkt wiederverbenutzt werden, da dieses beim Abtragprozess dem Verschleiß unterlegen ist. Zusätzlich vermischen sich die eingesetzten Strahlmittel mit den herausgelösten Ablagerungen, sodass bei Dekontaminationsarbeiten große Mengen an Sekundärabfall anfallen. Nach Schätzungen von Gellermann [Gel-03] ist bei der Dekontamination von Rohrleitungen mit einer Erhöhung der anfallenden Abfallmenge um einen Faktor 3, bezogen auf die ursprüngliche trockene Masse der Ablagerungen, zu rechnen.

Der Einsatz von Strahlverfahren zur Dekontamination von Rohrleitungen ist stark verbreitet. Die Dekontamination kann somit effektiv durchgeführt werden. Die erfolgreiche Dekontamination zeigt sich dabei durch blanke Rohroberflächen, die eine hohe Zuverlässigkeit des Verfahrens aufweisen.

2.2.2 Mechanische Verfahren ohne Hilfsstoffe

Mechanische Verfahren ohne Hilfsstoffe führen zu vernachlässigbaren Mengen an Sekundärabfall. Nach Bach [Bac-03] kann der Wirkmechanismus mechanischer Verfahren in drei verschiedene Gruppen unterteilt werden. Diese sind dynamische Verfahren, die auf einem Aufprallmechanismus basieren, und nicht dynamische Abtragverfahren mit geometrisch bestimmter sowie mit geometrisch unbestimmter Schneide. Verfahren, die auf einem Aufprallmechanismus basieren, zeigen sich bisher als nicht so effektiv wie die oben aufgezählten Strahlverfahren. Crabtree [Cra-99] stellt ein Verfahren vor, das mithilfe eines rotierenden Meißels Stöße auf die Ablagerungen überträgt. Die Schlagwirkung tritt in einer relativ geringen Häufigkeit von 5- bis 10-mal in der Sekunde auf. Dabei rotiert der Meißel mit einer vergleichbar langsamen Geschwindigkeit von circa 1/3 Umdrehungen in der Sekunde. Die daraus sich ergebende Abtragleistung wird als niedrig angegeben. Andere Verfahren mit geometrisch bestimmter/unbestimmter Schneide wie das Fräsen, Bohren, Schleifen oder Bürsten benötigen eine unmittelbare Zugänglichkeit zu den Ablagerungen beziehungsweise zur Rohrwand und sind durch den permanenten Kontakt mit der Rohrwandfläche einem großem Verschleiß unterworfen. Dadurch zählen diese Verfahren zu den kostenintensiven Dekontaminationsverfahren für Rohre. Aufgrund der schlechten Abtragleistung werden diese Verfahren öfter in Kombination mit anderen Verfahren wie den Strahlverfahren oder den chemischen Verfahren eingesetzt [Mac-04]. Der verfahrensbedingte permanent erforderliche Kontakt mit der Rohrwandfläche führt zu einer großen Anfälligkeit gegenüber Toleranzen, die bei einer Rohrleitung mit langer Einsatzdauer auftreten. Insbesondere zeigt sich dies bei Rohrleitungen, die nach dem Einsatzende aus der Erde gezogen werden und Deformationen aufzeigen. Die Leistungsfähigkeit der mechanischen Verfahren ist jedoch eingeschränkt, sodass nach einem Reinigungsversuch zusätzlich alternative Techniken eingesetzt werden, um die restlichen Ablagerungen aus dem Rohr zu entfernen. In einer Anwendung gemäß Mactaggart [Mac-04] wurden nach einem gescheiterten Fräseinsatz an bariumsulfathaltigen Ablagerungen Versuche mit Explosivstoffen in Rohrleitungen mit dem Ziel durchgeführt, einen Abtrag durch die Erzeugung von Druckunterschieden herbeizuführen. Der Explosivstoff wurde in kleinen Mengen an mehreren Stellen an einem Faden befestigt, der dann in die Rohrleitungen eingeführt wurde. Die anschließende Detonation der Explosivstoffe führte zu schlagartigen Druckerhöhungen und zu Riss- und Bruchbildung in den Ablagerungen.

Nach dem Stand der Technik stellen rein mechanische Verfahren ohne den Einsatz von Hilfsstoffen eine Randgruppe der Dekontaminationsverfahren dar. Es existieren viele unterschiedliche Ansätze wie zum Beispiel Verfahren mit rotierenden Bürsten und Verfahren die

auf Schleifen bis Bohren und Fräsen basieren, die sich jedoch nicht als standardisierte Techniken durchgesetzt haben. Mechanische Verfahren kommen bisher nur unter bestimmten Randbedingungen und unter großem Aufwand zum Einsatz. Aufgrund der schlechten Leistungsfähigkeit werden diese Verfahren mit Strahlverfahren kombiniert, was wiederum zur Problematik von Sekundärabfall führt.

2.2.3 Chemische Verfahren

Chemische Verfahren zur Dekontamination von Rohrleitungen funktionieren wie die oben beschriebenen hydromechanischen Verfahren zum Ausspülen von Rohren. Der Wirkmechanismus ist jedoch hauptsächlich die chemische Reaktion der eingesetzten Chemikalien mit der Ablagerungsschicht. Die chemische Reaktion führt zum Auflösen und zur Mobilisierung der Ablagerungsschicht. Bei den eingesetzten Chemikalien handelt es sich vorwiegend um Säuren, die das Gefüge der Ablagerung angreifen und den Zusammenhalt zerstören. Wichtige Einflussgrößen für die Effektivität des Verfahrens sind die Reaktionsfähigkeit der Ablagerungen mit Chemikalien und die Zugänglichkeit dieser zu der Ablagerungsoberfläche. Nach Crabtree [Cra-99] sind bariumsulfathaltige Ablagerungen sehr schwierig mit chemischen Verfahren zu entfernen. Dies liegt vorwiegend in der hohen Dichte und damit in einer kleinen Mikroporosität der Ablagerungsschicht begründet. Das erschwert ein Eindringen der Chemikalie in die Ablagerungen und verringert deren Reaktionsfähigkeit. Damit die eingesetzten chemischen Stoffe effektiv die Ablagerungen entfernen können, ist ein guter Zugang zu den Ablagerungen erforderlich. Hierbei kommt es auf ein gutes Verhältnis zwischen der Oberfläche und dem Volumen der Ablagerungen an. Bei Ablagerungen großer Dicke läuft eine Reaktion sehr langsam ab, sodass in solch einem Falle keine chemischen Verfahren eingesetzt werden. Chemische Verfahren werden auch eingesetzt, um die Förderleistung von Rohrleitungen während des Betriebs zu erhöhen. Dabei werden Chemikalien der Förderflüssigkeit beigemischt, um zum einen vorhandene Ablagerungen zu entfernen und zum anderen die Bildung von Ablagerungen zu vermeiden. Durch die Vermischung der Chemikalien mit den herausgelösten Ablagerungen tritt auch bei den chemischen Verfahren die Problematik des Sekundärabfalls auf. Zusammenfassend sind chemische Reinigungsverfahren vor allem für die Entfernung von sehr dünnen Ablagerungen (< 1 mm) geeignet. Im Vergleich zu den mechanischen Verfahren haben chemische Reinigungsverfahren den Vorteil, dass sie auch bei schwierig zugänglichen und komplizierten Strukturen vergleichsweise einfach eingesetzt werden können.

2.2.4 Thermische Verfahren

Bei thermischen Abtragverfahren werden mithilfe von Temperaturunterschieden Spannungen in das Werkstoffgefüge eingebracht. Die daraus resultierenden unterschiedlichen Dehnungen zwischen dem Werkstoff und dem Trägermaterial führen zu Rissen im Materialgefüge. Eine Möglichkeit zur Umsetzung dieses Verfahrensprinzips wurde von Mactaggart [Mac-04] beschrieben. Demnach wird mithilfe von flüssigem Stickstoff die Temperatur der Ablagerungen reduziert und dadurch werden die Ablagerungen damit in einen spröden Zustand überführt. Eine alternative Möglichkeit, um Dehnungen im Material zu erzeugen, ist durch die Erhöhung der Temperatur gegeben. Unter Zufuhr von Wärme und durch den Anstieg der Temperatur kann der unterschiedliche Ausdehnungskoeffizient des Trägerwerkstoffes und der Ablagerungen zu Rissen im Materialgefüge und insbesondere im Haftverbund führen. Ein weiteres thermisches Verfahren ist das Dekontaminationsschmelzen. Hierbei werden die Ablagerungen mitsamt dem Trägermaterial in einem Schmelzofen eingeschmolzen. Die nichtmetallischen Ablagerungen setzen sich in der Schlacke fest und können durch Zusatzstoffe aus der Schlacke entfernt werden. Das dadurch gewonnene Metall kann für verschiedene Zwecke wie zum Beispiel für die Herstellung von Stahlbehältern für den kerntechnischen Bereich eingesetzt werden. Die Schlacke mitsamt den Kontaminationen kann im Straßenbau weiterverwendet werden. Aufgrund der Kontaminationen der Ablagerungen kann das Dekontaminationsschmelzen nur in speziellen Öfen durchgeführt werden und gehört aufgrund des großen Energiebedarfs zu den teuersten Dekontaminationsverfahren. Aufgrund der besonderen Auflagen, die zum Betrieb dieser Anlagen benötigt werden, existieren nur wenige Orte, wo dieses Verfahren angewendet werden kann [Win-00].

2.2.5 Fazit zu Dekontaminationsverfahren für Rohre

Mechanische Verfahren mit Hilfsstoffen – wie das Strahlverfahren – zählen zu den standardmäßig eingesetzten Techniken für die Rohrdekontamination. Verfahrensbedingt kommt es zur Bildung von radioaktiv kontaminiertem Sekundärabfall. Der Einsatz von rein mechanischen Verfahren ohne Hilfsstoffe ist nur vereinzelt aus der Literatur bekannt. Aufgrund der schlechten Leistungsfähigkeit werden sie öfter in Kombination mit anderen Verfahren eingesetzt. Chemische Verfahren eignen sich nur für bestimmte Ablagerungstypen und müssen speziell auf die Ablagerungen abgestimmt werden. Für Ablagerungen großer Dicke (> 1 mm) sind chemische Verfahren nicht geeignet. Der Einsatz von Chemikalien führt auch hier zum Auftreten von Sekundärabfall. Thermische Verfahren, die einen Abtrag durch Temperaturunterschiede im Material hervorrufen, sind nur konzeptionell untersucht worden. Das

Dekontaminationsschmelzen hat den Nachteil, dass es energieintensiv ist und nur in speziellen Schmelzöfen durchgeführt werden kann.

Zusammengefasst hat der Stand der Technik den Bedarf an einer effizienten Reinigungstechnologie ohne Sekundärabfall für das Dekontaminieren der Rohre aufgezeigt. Im Rahmen dieser Arbeit werden Untersuchungen durchgeführt, um ein neues Verfahren für diesen Zweck zu entwickeln und zu qualifizieren. Die Anforderungen an dieses neue Verfahren resultieren aus den Nachteilen der gängigen Dekontaminationstechnologien für Rohrleitungen. Unter anderem sind dies die großen Mengen anfallender Sekundärabfälle, des Weiteren die geringe Leistungsfähigkeit sowie der große Energieverbrauch.

2.3 Grundlagen zum Bruch von spröden Materialien

Die Technische Mechanik liefert Erklärungen für das Versagen von Stoffen aufgrund äußerer Belastung. Die im Laufe der Zeit entwickelten Versagenshypothesen helfen, ein Bauteil bei gegebener Belastung zu dimensionieren. Nach der klassischen Festigkeitshypothese und dem daraus abgeleiteten Festigkeitsnachweis wird das Versagen von Bauteilen wegen äußerer Belastungen hervorgerufen. Ein Versagen tritt erst dann ein, wenn die im Material wirkenden Spannungen aufgrund der Belastung eine materialspezifische Größe wie die Streckgrenze oder die Bruchgrenze überschreiten. Hierbei werden Fehler im Materialgefüge, die ein frühzeitiges Versagen herbeiführen können, nicht berücksichtigt. Die Unsicherheit aus der idealisierten Annahme eines fehlerfreien Werkstoffgefüges zeigt sich durch Sicherheitsfaktoren, die bei der Dimensionierung berücksichtigt werden müssen und damit die zulässige Belastung weiter reduzieren. Trotz der Sicherheitsfaktoren kann es zu einem Versagen deutlich unterhalb der Festigkeitsgrenze kommen, das durch Materialfehler im Gefüge verursacht wird. Die alleinige Dimensionierung von Bauteilen nach der Festigkeitshypothese ist daher nicht ausreichend. Zur Berücksichtigung der Materialfehler im Bauteil ist ein zusätzlicher bruchmechanischer Nachweis erforderlich. Die Bruchmechanik erklärt die Ursachen für ein Versagen von Bauteilen aufgrund von Fehlern im Materialgefüge.

Das Entfernen von Rohrablagerungen durch ein mechanisches Werkzeug entspricht dem Abtrag von spröden Materialien. Anders als bei der Dimensionierung von Bauteilen geht es hier um das absichtliche Herbeiführen eines Materialversagens durch äußere Belastungen. Anders als zuvor soll hier die von außen wirkende Belastung zu einer Überschreitung der Belastungsgrenze des Materials führen, damit eine gewünschte Schädigung des Materials in Form eines Abtrags auftreten kann. Mithilfe der linear-elastischen Bruchmechanik kann der Abtragsvorgang erklärt werden. Nachfolgend werden die bruchmechanischen Grundlagen vorgestellt, indem zunächst

auf die Ursache des Bruchs von Materialien unter Belastung eingegangen wird. Anschließend wird der Stand der Technik zu Werkzeugen und Verfahren erklärt, die zum Einsatz kommen, um einen entsprechenden Beanspruchungszustand in das Material einzubringen, sodass ein Abtrag ermöglicht werden kann. Die genaue Wirkungsweise des Werkzeugs beziehungsweise des Verfahrens wird anhand von existierenden Modellen erläutert.

2.3.1 Bruchmechanische Ursachen von Materialversagen

Materialien sind aus Atomen zusammengesetzt, die durch Kohäsionskräfte zusammengehalten werden. Der Bruch eines spröden Werkstoffs ist eine vollständige Zerstörung dieser Verbindungen untereinander. Die Kräfte der Atomverbindungen bestimmen dabei die Festigkeit des Stoffes. Die theoretisch erforderliche Spannung, um eine Atomverbindung aufzuheben kann anhand der spezifischen Oberflächenenergie γ_0 , dem Elastizitätsmodul E und dem Atomabstand r_a gemäß [Han-71] oder [Gro-11] wie folgt abgeschätzt werden:

$$\sigma_{th} \approx \sqrt{\frac{E \cdot \gamma_0}{r_a}} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{th} \approx \frac{E}{\pi} \quad \text{Formel 2-1}$$

Die Spannung σ_{th} aus Formel 2-1 stellt die theoretische Festigkeit des Materials dar, wenn angenommen wird, dass der Bruch die gleichzeitige Trennung aller atomaren Verbindungen im Bruchquerschnitt darstellt. Tatsächlich kommt es bei einer sehr viel kleineren Spannung zum Bruch des Materials, als mit der theoretischen Festigkeit vorhergesagt wurde. Die Ursache hierfür liegt an Imperfektionen im Materialgefüge, die sich zum Beispiel durch Einschlüsse, Poren und Risse zeigen. Diese Materialfehler stellen den eigentlichen Grund für den Bruch eines Materials wegen einer wesentlich kleineren mechanischen Belastung dar. An diesen Fehlstellen herrscht bei anliegender Belastung eine Spannungsüberhöhung, die zu Bildung und Wachstum von Rissen im Material führt. Die Ursache des Bruchs wurde phänomenologisch zum ersten Mal von A. A. Griffith durch eine energetische Betrachtung erklärt. In dieser Modellvorstellung geht Griffith zum einen von einer Oberflächenenergie aus, die ein Material aufgrund der Oberfläche besitzt, und zum anderen von einer elastischen Energie, die im Material wegen einer anliegenden Belastung vorhanden ist [Gri-21]. Bei einem Bruch vergrößert sich die Oberflächenenergie eines Materials, da sich neue Bruch-Oberflächen gebildet haben. Gleichzeitig wird beim Bruch auch die Wirkung der äußeren Belastung – die Spannung im Material – aufgehoben. Durch die Entlastung des Materials wird die gespeicherte elastische Energie abgegeben. Der Ausgangspunkt eines Bruchs in einem Material ist nach Griffith der Riss, der durch die äußere Belastung anwächst und damit die Oberfläche sowie die

Oberflächenenergie des Materials vergrößert. Gleichzeitig nimmt mit wachsendem Riss die elastisch gespeicherte Energie des Materials ab. Kurz vor dem Bruch herrscht ein Gleichgewicht zwischen der elastisch gespeicherten Energie und der Oberflächenenergie des Materials, das sich durch ein Maximum der Gesamtenergie beziehungsweise durch ein Minimum bei der Änderung der Gesamtenergie zeigt. Der Riss besitzt zu diesem Zeitpunkt eine kritische Größe. Wird die Belastung weiter erhöht, so kommt es zu einem instabilen Risswachstum mit wachsender Oberflächenenergie und abnehmender elastischer Energie, bis der thermodynamisch stabile Zustand des vollständigen Bruchs erreicht ist. In dem Diagramm der nachfolgenden Abbildung 5 ist der Zusammenhang der beiden Energien über die Risslänge dargestellt. Die Gesamtenergie ist die Differenz dieser beiden Energien und erreicht, wie bereits erwähnt, das Maximum bei der kritischen Risslänge.

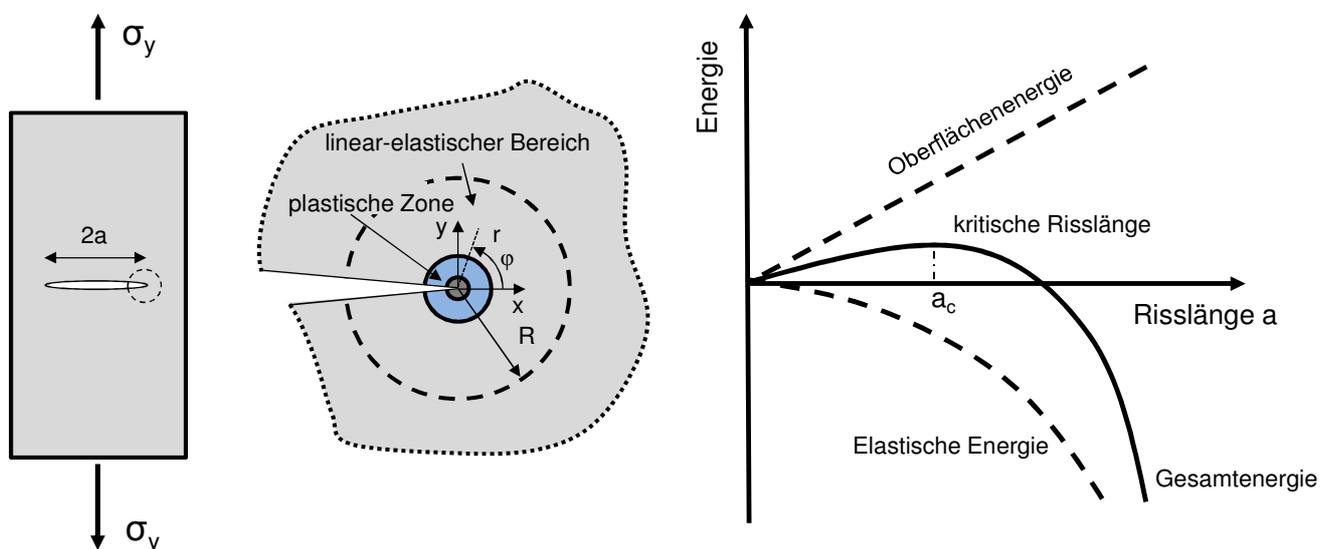


Abbildung 5: Riss im Material, Rissumgebung und Energieverteilung [Gri-21] [Gro-11]

Basierend auf der Beschreibung von Griffith stellte G.R. Irwin das Konzept des Spannungsintensitätsfaktors K auf und entwickelte daraus das Konzept, Spannungsintensitätsfaktoren als Bruchkriterium zu verwenden. Diese beschreiben die Spannungen und Deformationen in einer kreisförmigen Region um die Risspitze herum. Dabei kann der Spannungsintensitätsfaktor als ein Maß für die Stärke des Spannungsfeldes an der Risspitze gesehen werden. Dieses Risspitzenfeld ist nach der linear-elastischen Bruchmechanik, wie in Abbildung 5 dargestellt, durch einen äußeren Radius R und einen inneren Radius r um die Risspitze herum definiert. Die plastische Zone direkt an der Risspitze wird bei spröden Materialien als klein vorausgesetzt und damit das dominierende Bruchverhalten des Rissfeldes als linear-elastisch angenommen. Nach der linear-elastischen Bruchmechanik

werden drei grundlegende Rissöffnungsarten und Belastungssituationen unterschieden. Relativ zur Lage eines Risses ergeben sich die in der nachfolgenden Abbildung 6 dargestellten Belastungsarten. Mithilfe dieser drei Rissöffnungsarten kann das bruchmechanische Versagen eines Bauteils erklärt werden.

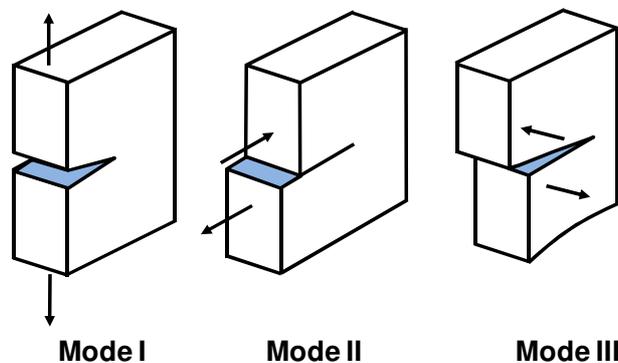


Abbildung 6: Rissöffnungs- und Beanspruchungsarten (Mode I reine Normalbeanspruchung, Mode II ebene Scherbeanspruchung, Mode III nichtebene Scherbeanspruchung)

Bei der Beanspruchung nach dem Mode I handelt es sich um eine Zugbeanspruchung des Risses, bei der Beanspruchung nach dem Mode II um eine ebene Scherbeanspruchung und bei der Beanspruchung nach dem Mode III um eine nichtebene Scherbeanspruchung. Für jeden dieser drei Rissöffnungsarten können die Gleichungen für die Spannung und die Deformation in Abhängigkeit des Spannungsintensitätsfaktors K hergeleitet werden. Die Gleichungen des Spannungszustandes für den Modus I sind nachfolgend ohne Herleitung in kartesischen Koordinaten gemäß [Gro-11] aufgeführt.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \begin{pmatrix} 1 - \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \sin\left(3\frac{\varphi}{2}\right) \\ 1 + \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \sin\left(3\frac{\varphi}{2}\right) \\ 1 - \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \cos\left(3\frac{\varphi}{2}\right) \end{pmatrix} \quad \text{Formel 2-2}$$

Ähnliche Gleichungen für die Beschreibung des Spannungszustandes existieren ebenso für die Rissbeanspruchung nach Mode II und Mode III. Der Spannungsintensitätsfaktor K in Formel 2-2 hängt von der Geometrie des Körpers, der Lage und der Größe des Risses und insbesondere von der äußeren Belastung ab. Für einfache Fälle können die Spannungsintensitätsfaktoren analytisch berechnet werden. Für komplizierte Fälle werden diese numerisch oder experimentell ermittelt. Der Spannungsintensitätsfaktor ist damit ein Kriterium für das Versagen eines spröden Materials in Form eines Bruchs. Der maximal von einem Material übertragene Spannungsintensitätsfaktor K_{IC} wird als Bruchzähigkeit bezeichnet. Dieser ist ein

Materialkennwert und kann im Rahmen von Versuchen ermittelt werden. Bei der Überschreitung der Bruchzähigkeit eines Körpers kommt es im dem Material zu einem instabilen Risswachstum und damit zum Bruch. Entsprechend lautet das Bruchkriterium:

$$K_{I,II,III} \geq K_{IC,IIIC,IIIC}$$

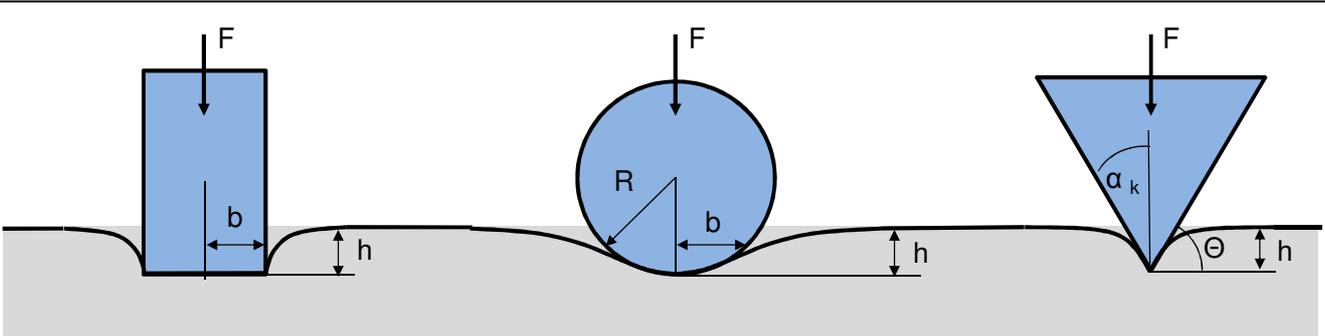
Die entscheidende Größe beim Versagen von spröden Materialien sind daher Risse und die äußere Belastung, die die Bruchzähigkeit überschreiten und zu instabilem Risswachstum und damit zum Bruch führen. Um eine passende Belastung in das Material einzubringen, sind Bearbeitungswerkzeuge erforderlich. Durch den Kontakt von Werkzeugen mit der Oberfläche eines Materials werden Kräfte übertragen und damit Spannungen im Material erzeugt. Es existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Werkzeugen, die auf wenigen Prinzipien beruhen. Nachfolgend wird für die grundlegenden Werkzeuggeometrien die Beziehung zwischen der Kraft und der Eindringtiefe vorgestellt.

2.3.2 Eindringvorgang durch ein mechanisches Werkzeug

Die mechanische Zerstörung eines Werkstoffgefüges erfolgt aufgrund von Belastungen, die zu Rissinitiierung, Risswachstum und Bruch führen. Die Belastungen werden mithilfe von Werkzeugen über den Kontakt mit der Materialoberfläche eingebracht. Bei einem spröden Material sind Risse oder Fehler in verschiedenen Orientierungen im Materialgefüge vorhanden. Die äußere Belastung führt dazu, dass Risse geöffnet werden und diese sich zu größeren Rissen zusammenschließen, bis eine kritische Risslänge erreicht worden ist. Anschließend kommt es zu einem instabilen Risswachstum, das mit dem Bruch des Materialgefüges endet. Bevor es zum Bruch des Materials kommt, muss das Werkzeug in die Oberfläche eindringen. Die hierfür erforderliche Höhe der Kraft ist von vielen Faktoren des Materials und der Werkzeuggeometrie abhängig. Hierbei muss beim Eindringen eines Werkzeugs in das Material der Materialwiderstand überwunden werden. Die hierfür erforderliche Kraft kann für den elastischen Materialbereich und für einfache Grundkontaktformen analytisch bestimmt werden. Da ein spröder Werkstoff kein ausgeprägtes plastisches Verhalten aufweist, kommt es im Anschluss an die elastische Grenze zu einem Versagen in Form eines Sprödbruchs. Die analytisch aufgestellte Beziehung zwischen der Kraft und der Eindringtiefe in einem ideal spröden Material kann daher für eine Abschätzung der real wirkenden Kräfte genutzt werden. Die Information über die benötigte Kraft ist erforderlich, um eine geeignete Maschinenteknik für den Abtragprozess zur Verfügung zu stellen. Die Kraft wird in der Regel von einem Werkzeugträger auf ein Werkzeug übertragen und durch die Werkzeugspitze in das Material eingebracht. Die eingesetzten Werkzeuggeometrien zum Abtrag von Stoffen lassen sich in die

Grundgeometrie Kugel, Kegel, Keil oder Zylinder einteilen. Für diese einfachen Fälle und die Annahme eines idealelastischen Verhaltens des Werkstoffs kann die Beziehung zwischen der benötigten Kraft F und der Eindringtiefe h wiedergegeben werden. Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt jeweils die Widerstandskraft des Materials, die einem eindringenden Werkzeug bei der Eindringtiefe h entgegengebracht wird. Popov [Pop-10] gibt die Kraft-Eindringtiefe-Beziehung in Abhängigkeit des Elastizitätsmodus für einen Zylinder, eine Kugel und einen Kegel an. Bei sprödem Werkstoffverhalten ist die Druckfestigkeit die Spannung, die am Ende einer elastischen Verformung aufgenommen wird, bevor es zu einem Versagen des Materials kommt. Die Kraft-Eindringtiefe-Beziehung kann daher auch in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit σ_{Druck} angegeben werden. Evans [Eva-66] hat die Kraft-Eindringtiefe-Beziehung in Abhängigkeit der Druckfestigkeit für ein keilförmiges Eindringwerkzeug mit einer Länge l und einem Keilwinkel α_k hergeleitet.

Tabelle 2: Kraft-Eindringtiefe-Beziehungen für unterschiedliche Geometrien bei einem elastischen Material



Zylinder	Kugel	Kegel/Keil
$F = 2 \cdot b \cdot E^* \cdot h$ $E^* = \frac{E}{(1-\nu^2)}$	$F = \frac{4}{3} \cdot E^* \cdot R^{\frac{1}{2}} \cdot h^{\frac{3}{2}}$	$F_{\text{Kegel}} = \frac{2}{\tan(\theta) \cdot \pi} \cdot E \cdot h^2$ $F_{\text{Keil}} = \sigma_{\text{Druck}} \cdot 2 \cdot h \cdot l \cdot \tan(\alpha_k)$

Wie aus Tabelle 2 zu erkennen ist, ist die benötigte Kraft für das Eindringen in ein Material von der Geometrie des Werkzeugs und den Materialeigenschaften abhängig. Um mit einem Werkzeug in ein Material einzudringen, ist die wichtige und einzig veränderbare Größe bei einer definierten Werkzeuggeometrie die äußere Belastung in Form der Kraft. Mithilfe dieser Größe kann die Eindringtiefe und damit auch die eingebrachte Beanspruchung im Material gesteuert werden. Die sich dabei ergebende Beanspruchung zeigt sich im Material durch Spannungen und

Verformungen. Damit die gewünschte Schädigung in Form eines Bruchs eintreten kann, muss die Beanspruchung einen kritischen Wert überschreiten.

2.3.2.1 Bruchvorgang durch ein mechanisches Werkzeug

Das Eindringen eines spitzen Werkzeugs in ein Material führt zu Verformungen und damit zum Aufbau eines Spannungszustandes, der dann zu einem Bruchvorgang führen kann. Der durch die Einbringung verursachte Spannungszustand in einem spröden Werkstoff kann, wie bereits beschrieben, für unterschiedliche Eindringwerkzeuge für den elastischen Bereich analytisch bestimmt werden [Hertz] [Car-97] [Law-75]. Hierbei ist ein idealer spröder Werkstoff die Voraussetzung. Bei einem realen Werkstoff hingegen führt die hohe Spannungskonzentration an der Werkzeugspitze lokal zu nicht elastischen Verformungen innerhalb eines sonst elastischen Beanspruchungsgebietes. Die Beschreibung dieser plastischen Verformungszone ist durch analytische Methoden komplex und nur begrenzt möglich. Qualitativ wurde der durch eine Werkzeugspitze belastete Bereich in verschiedenen Untersuchungen beschrieben [Law-75] [San-85] [Che-06]. Demnach kann der Spannungsbereich in einem spröden Material beim Eindringen eines spitzen Körpers in verschiedene Zonen eingeteilt werden. Unmittelbar unterhalb der Eindringkörperspitze existiert ein Kernbereich, der einen hydrostatischen Druck auf das übrige Material ausübt. Danach folgen ein plastischer sowie ein daran angeschlossener elastischer Materialbereich. Die einzelnen Zonen sind in der nachfolgenden Abbildung 7 schematisch dargestellt.

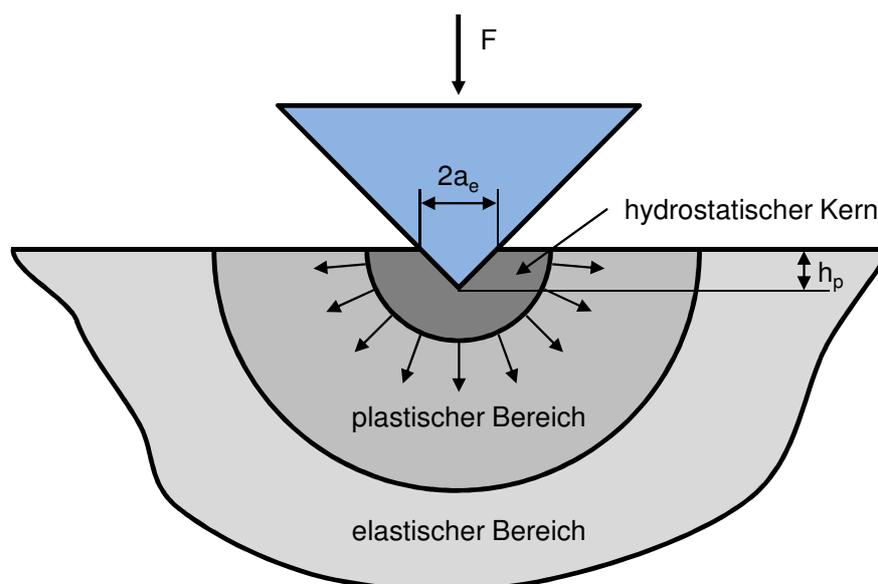


Abbildung 7: Modell für eine elastisch-plastische Eindringung [Law-75] [Che-06]

Nach dieser Modellvorstellung kommt es zu einer Rissentstehung im plastischen Bereich. Die Ursache der Rissentstehung liegt, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, an Spannungsüberhöhungen, die an den Grenzen von Materialfehlern herrschen. Nach der Rissinitiierung wächst der Riss in Abhängigkeit der Belastung bis zum vollständigen Durchtrennen des Materials heran. Für eine punktförmige, zyklische Belastung wurde der Schädigungsverlauf von Lawn [Law-75] näher beschrieben und ist in der nachfolgenden Sequenz in Abbildung 8 dargestellt. Die punktförmige Belastung führt zunächst zur Bildung einer plastischen Zone aus zerdrücktem und verdichtetem Material (blau markiert). Bei weiterer Erhöhung der Belastung kommt es zur Vergrößerung dieser Zone und irgendwann zur Rissinitiierung an der Grenze zum plastischen Bereich. Danach wächst der Riss stabil in Abhängigkeit der Erhöhung der Belastung. Wird die Belastung reduziert, so beginnt sich der geöffnete Riss wieder zu schließen. Durch die Entlastung des Materials kommt es jedoch gleichzeitig zur Entstehung eines lateralen Risses, der an der plastischen Zone anfängt und in Richtung der Oberfläche weiterwächst. Erreicht der Riss die Materialoberfläche, so kommt es zum Herauslösen von Bruchstücken.

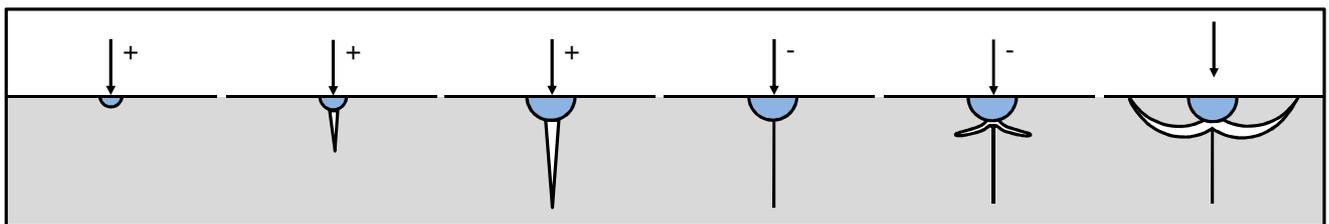


Abbildung 8: Ausbildung eines lateralen Risses und Herauslösen von Bruchstücken bei einer punktförmigen Belastung [Law-75]

Die wiederholte Belastung des Materials an derselben Stelle führt zum erneuten Öffnen und zum Anwachsen des vertikalen Risses. Nach [Law-75] lassen sich alle durch einen Eindringkörper hervorgerufenen Belastungen auf eine punktförmige Beanspruchung zurückführen.

Bruno [Bru-05] beschreibt einen ähnlichen Schädigungsverlauf beim Schlagbohren. Demnach wird beim Schlagbohren die Kraft zyklisch auf das Gestein übertragen sowie allmählich aufgebaut. Der erste Kontakt des Werkzeugs mit der Materialoberfläche führt zu einer lokalen Zertrümmerung und zu einem Zusammendrücken des Materials an der Werkzeugspitze. Die folgenden Werkzeugschläge führen zu einem starken Ansteigen der Kraft sowie zur Bildung von Rissen im Material, die zu einer Pulverisierung der Zone direkt unterhalb der Werkzeugspitze führt. Diese Zone entspricht dem oben beschriebenen hydrostatischen Kern. Das Ausformen von größeren Bruchstücken verläuft, wie oben beschrieben, durch Risse im Material, die jeweils bis zur Oberfläche führen können. Das Herausbrechen der Bruchstücke führt immer zu einem

Kraftabfall am Werkzeug. Die Kraft muss anschließend durch weiteres Eindringen in das Material wieder aufgebaut werden, sodass der Bruchvorgang wiederholt werden kann. Beim Schlagbohren kommt ein zusätzlicher Schädigungsmechanismus zum Einsatz. Die hohe zyklische Belastung des Werkstoffs führt zu Materialermüdung durch Bildung von Mikrorissen, womit ein Festigkeitsabfall begünstigt wird [Geh-97].

Je nach Materialeigenschaft, Geometrie des Eindringkörpers und Belastung, können sich mehrere Risse im Material gleichzeitig ausbilden. Der Verlauf der Schädigung ist hier ähnlich ausgeprägt. Gehring [Geh-97] hat den Schädigungsverlauf anhand einer Sequenz in der nachfolgenden Abbildung 9 beschrieben. Die Spitze des Werkzeugs dringt dabei senkrecht in das Material hinein und verursacht an der Eindringstelle einen Spannungszustand. Lokal, unmittelbar an der Werkzeugspitze, wird das Material durch das weitere Eindringen zertrümmert. Durch das Eindringen der Werkzeugspitze wird das Material auseinandergedrückt und auf Zug beansprucht. Im Material bilden sich laterale Risse aus, die wie zuvor auch zur Oberfläche wandern und damit zum Fragmentieren der Oberfläche führen.

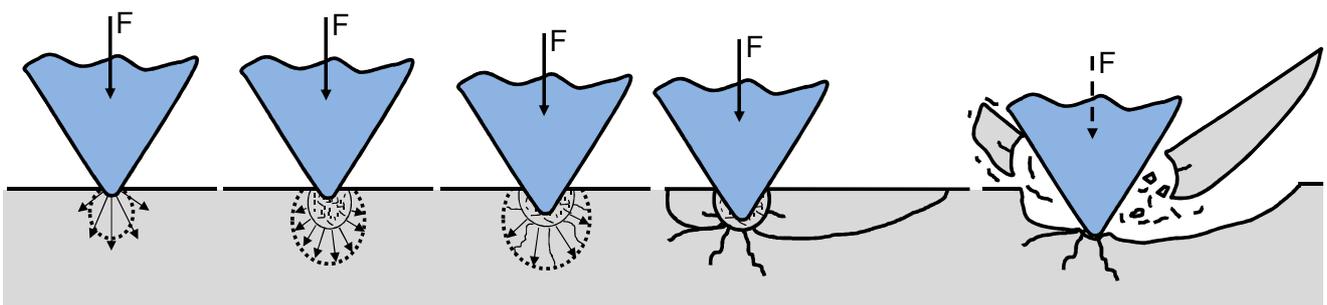


Abbildung 9: Fragmentierungsprozess unter Einsatz eines senkrecht angreifenden Werkzeugs [Geh-97]

Die Größe der gebildeten Fragmente ist von der Materialeigenschaft und dem eingesetzten Verfahren sowie von den Werkzeugen und damit von der wirkenden Belastung auf das Material abhängig. Allgemeingültige Aussagen zu Fragmentgrößen können nur schwer getroffen werden. Nach Gehring werden tendenziell größere Fragmentstücke gebildet, wenn die Eindringtiefe zunimmt und das Werkzeug größer wird. In der Regel kann die Belastung jedoch nicht beliebig erhöht werden. Grenzen der Belastung sind beispielsweise durch die Werkzeuggeometrie, die Kraftübertragung sowie die Möglichkeit der Entfernung der Fragmente aus der Bruchzone gegeben. Des Weiteren spielen auch hier die Festigkeitsgrenzen des eingesetzten Werkzeugs eine wichtige Rolle. Zudem wird durch Verschleißerscheinungen beim Werkzeug die Abtragleistung reduziert. Der Verschleiß der eingesetzten Werkzeuge spielt insbesondere auch bei der wirtschaftlichen Bewertung eines Abtragverfahrens eine große Rolle.

Zipf [Zip-89] untersucht die Staubbildung beim Eindringvorgang eines spitzen Werkzeugs in Kohle. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt die Modellvorstellung eines schrägen Eindringens eines spitzen Werkzeugs in vier Stufen. Die vom Werkzeug übertragene Kraft wirkt dabei parallel zur Werkzeugoberfläche. Erkennbar sind in Abbildung 10 auch die oben genannten Bereiche. Direkt unterhalb der Werkzeugspitze und beim ersten Kontakt bildet sich eine sogenannte Druckzone mit fein fragmentiertem Material. Die Entstehung von sehr feinkörnigem Material ist bei jeder Fragmentierung gegeben. Bei weiterem Eindringen des Werkzeugs wächst diese Zone bis auf ein Maximum, dargestellt im zweiten Bild in Abbildung 10. Gleichzeitig beginnen außerhalb dieser Zone und um die Werkzeugspitze herum die Bildung und das Zusammenwachsen von Rissen, bis es zu einem schlagartigen Freisetzen der elastischen Energie und damit zum Bruch von Fragmenten kommt. Die fein fragmentierte Zone um die Werkzeugspitze herum besitzt ihre maximale Ausdehnung bei maximaler Kraft. Diese fällt anschließend ab, sobald es zu einer Fragmentierung kommt. Das Herauslösen der Fragmente geschieht anschließend durch das weitere Eindringen des Werkzeugs in das Material. Durch die Relativ- und Scherbewegung der Fragmentstücke untereinander kann nicht nur die Menge des feinkörnigen Materials weiter vergrößert werden, sondern auch zur Bildung von neuen Rissen beitragen. Die überschüssige elastische Energie im Material beschleunigt beim Bruch die gebildeten Fragmente, sodass es zum Herausschleudern von Bruchstücken aus dem Material kommt [Wag-71].

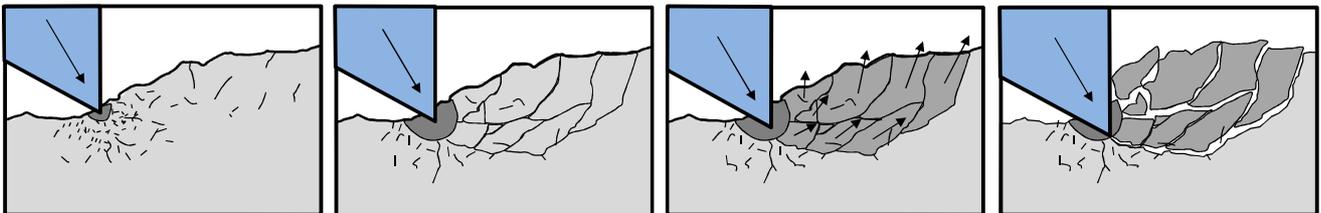


Abbildung 10: Fragmentierung unter Einsatz eines parallel zur Oberfläche angreifenden Werkzeugs [Zip-89]

Der Bruchvorgang durch die Bildung von Bruchfragmenten kann anhand des Kraftverlaufs des Werkzeugs beim Eindringen in das Material erkannt werden. Der Kraftverlauf zeigt während des Eindringens ein typisches gezacktes Profil an. Die Kraft steigt zunächst an und fällt jeweils ab, sobald Risse gebildet sind und Material fragmentiert wird [Zip-89] [Geh-97].

2.3.2.2 Beanspruchungszustand durch ein keilförmiges Werkzeug

Keilförmige Werkzeuge wurden bereits in der Frühgeschichte der Menschheit eingesetzt, um Materialien wie zum Beispiel Stein zu bearbeiten. Bei einem Keil wird die vorwärts gerichtete Kraftkomponente beim Eindringen in das Material in die Kraftkomponenten senkrecht zu der

Seitenfläche umgelenkt. Dadurch wird das Material durch die Seitenkräfte auseinandergedrückt und gespalten. Der Anteil der seitlichen Kraftkomponenten wird durch den Keilwinkel definiert. Beim Eindringen eines Keils in einen spröden Werkstoff verlaufen der Bruchvorgang und die Fragmentierung ähnlich wie bereits beschreiben. Die für den Bruch notwendigen Kräfte variieren in einem großen Bereich. Daher ist es besonders schwierig, für spröde Werkstoffe die erforderliche Beanspruchung zur Herbeiführung eines Bruchs genau zu definieren. Die Kraft und die Energie beim Eindringvorgang hängen von der Eindringtiefe, der Werkzeuggeometrie und vom Material ab. Zur Abschätzung der erforderlichen Eindringkräfte in einem spröden Material wurden in verschiedenen Untersuchungen aus der Literatur Annahmen getroffen und basierend darauf analytische Formeln aufgestellt, die eine Abschätzung der Eindringkräfte ermöglichen. Nach der Annahme von Evans [Eva-66] ist das Versagen eines Materials unter der Belastung von einem Keil neben der Geometrie des Keils auch von der Zugfestigkeit des Materials abhängig. Demnach verursacht der Keil beim Eindringvorgang einen Spannungszustand, der im Material zu einem Versagen aufgrund der Überschreitung der Zugfestigkeit führt. Nishimatsu [Nis-72] hat die Größe der Scherfestigkeit als Kriterium für die Herleitung der Schneidkraft angesetzt. Untersuchungen von Whittaker [Whi-73] und Rox [Rox-73] haben die Annahme von Evans in experimentellen Untersuchungen bestätigt. Die von Evans postulierte Schneidkraft eines Keils in einem spröden Material und das daraus folgende Versagen wegen Überschreitung der Zugfestigkeitsgrenze werden demnach mithilfe der Eindringtiefe h , dem Keilwinkel α_k , dem Reibungswinkel φ_r zwischen den Seitenflächen des Keils und der Zugfestigkeit σ_{Zug} des Materials bestimmt.

$$F_{\text{Schneidkraft}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{Zug}} \cdot h \cdot \sin(\alpha_k + \varphi_r)}{1 - \sin(\alpha_k + \varphi_r)} \quad \text{Formel: 2-3}$$

Anhand der einfachen Formel 2-3 kann erkannt werden, dass die benötigte Bruchkraft umso kleiner ausfällt, je kleiner der Keilwinkel α_k gewählt wird. Bei einem spitzen Werkzeug sind daher die Eindringkräfte deutlich geringer. Die dem Eindringen vom Material entgegengesetzte Widerstandskraft durch das Material wurde bereits in Tabelle 2 aufgeführt. Mithilfe der dort aufgeführten Formel und der Formel 2-3 hat Whittaker [Whi-73] eine Formel für die Abschätzung der zum Eindringen benötigten Energiemenge hergeleitet. Die Formel 2-4 gibt die benötigte Energiemenge U_E für das Eindringen eines keilförmigen Werkzeugs in ein sprödes Material und die vorgegebene Eindringtiefe wieder.

$$U_E = \frac{\sigma_{\text{Zug}} \cdot h^2}{k \cdot L} \cot(\alpha_k) \cdot \left[\frac{\sin(\alpha_k + \varphi_r)}{1 - \sin(\alpha_k + \varphi_r)} \right] \quad \text{mit } k = \frac{\sigma_{\text{Druck}}}{\sigma_{\text{Zug}}} \quad \text{Formel: 2-4}$$

Demnach ist die benötigte Schneidenergie quadratisch von der Eindringtiefe des Keils abhängig. Zudem übt der Geometrieterm in der eckigen Klammer einen großen Einfluss auf die benötigte Eindringenergie aus. Mit wachsendem Keilwinkel nimmt der Term in der eckigen Klammer annähernd exponentiell zu. Es zeigt sich hier deutlich der Einfluss der Geometrie auf die Schneidkräfte und die Schneidenergie. Daraus lässt sich ein großes Optimierungspotential für die Gestaltung der Werkzeuggeometrie ableiten. Für jedes Einsatzgebiet kann eine geeignete Werkzeugform definiert werden, um die einwirkenden Kräfte im Material zu vergrößern, den Verschleiß zu verringern und die Effizienz des Abtragsverfahrens durch einen niedrigen spezifischen Energieverbrauch zu steigern. Es existieren daher verschiedene Möglichkeiten von Werkzeugformen, um eine bestimmte Belastung in ein Material einzubringen. Im Folgenden wird eine Einteilung nach den Wirkmechanismen der typischen Werkzeugformen vorgenommen.

2.3.3 Wirkmechanismen beim Abtrag

Für die unterschiedlichsten Fälle der Bearbeitung von spröden Materialien wurde im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Verfahren entwickelt. Die Funktionsweise dieser Verfahren kann durch Grundprinzipien der Kraftübertragung erklärt werden. Die Kenntnisse über diese Zusammenhänge tragen zum besseren Verständnis des Verfahrens bei und liefern Erklärungen über die wirkenden Mechanismen beim Abtragsvorgang. Jedes mechanisch arbeitende Verfahren realisiert über die Einbringung von Kräften in das Material den Abtrag. Dabei kann die Kraftübertragung bei jedem Verfahren durch die drei Größen Krafrichtung, Kraftwirkung und Art der Krafeinbringung definiert werden. Jedes dieser drei Kriterien besitzt jeweils zwei Merkmalsausprägungen, die im Weiteren näher beschrieben werden. Die Einteilung von Werkzeugen nach diesen drei Kriterien ergibt insgesamt acht Kombinationsmöglichkeiten. Nach diesen Prinzipien der Kraftübertragung können alle mechanischen Abtragsverfahren aufgeteilt werden. In Tabelle 3 sind diese Kombinationsmöglichkeiten aufgeführt und jeweils mit Beispielen erläutert.

Abtragsverfahren entfernen Material ausgehend von der Oberfläche bis zur gewünschten Eindringtiefe. Dabei überträgt die Werkzeugspitze Kräfte auf die Materialoberfläche. Die Richtung der Kraftwirkung beeinflusst, ob das Material unter der Werkzeugspitze auf Zug oder auf Druck beansprucht wird. Bei diesem Unterscheidungskriterium Krafrichtung geht es um die Hauptrichtung der auf der Oberfläche wirkenden Kraft eines Abtragwerkzeugs. Diese kann entweder vorwiegend parallel oder senkrecht zur Oberfläche des abzutragenden Materials wirken [Hoo-00]. Verläuft die Krafrichtung bei einem Werkzeug hauptsächlich parallel zur Materialoberfläche, so handelt es sich um einen schneidenden Materialabtrag. Werkzeuge, die die Belastung senkrecht auf die Materialoberfläche aufbringen und dadurch einen Abtrag

erzielen, funktionieren nach dem Prinzip des senkrechten Eindringens. Dabei wird die Werkzeugspitze unter hohem Druck auf die Materialoberfläche angepresst und das Material lokal durch hohe Beanspruchung zertrümmert.

Tabelle 3: Einteilung von Abtragverfahren nach Krafrichtung, Kraftwirkung und Krafteinbringung

Krafrichtung	Kraftwirkung	Krafteinbringung	Werkzeuge & Verfahren
Parallel	Punktlast	Dynamisch	Fräsen (Rundschaftmeißel)
Parallel	Punktlast	Quasistatisch	Drehschlagbohren ⁶
Parallel	Linienlast	Dynamisch	ODC, Schällamelle, Flachmeißel
Parallel	Linienlast	Quasistatisch	Hobelmeißel (schälende Bearbeitung)
Senkrecht	Linienlast	Quasistatisch	Schneidplatte, Rollenmeißel (Zahnrolle)
Senkrecht	Linienlast	Dynamisch	Hämmer
Senkrecht	Punktlast	Dynamisch	Schlaglamellen, Schlagbohren ⁷
Senkrecht	Punktlast	Quasistatisch	Rollenmeißel (Warzenrolle)

Je nachdem, wie die Krafrichtung beim Abtragvorgang wirkt, wird die Beanspruchung der eingesetzten Werkzeuge maßgebend beeinflusst. Aufgrund der hohen Beanspruchung ist die Werkzeugspitze aus gehärtetem Stahl, Hartmetalleinsätzen oder speziellen Legierungen gefertigt. Die hohe Beanspruchung zeigt sich im Verschleiß der Werkzeuge, die in Abhängigkeit der Krafrichtung unterschiedlich hoch sein kann. Bei senkrecht eindringenden Werkzeugen ist im Vergleich zu den schneidend arbeitenden Werkzeugen der Verschleiß geringer, da hier die Werkzeugspitze vorwiegend auf Druck beansprucht wird. Die schneidende Werkzeugspitze wird hingegen neben der Druckbeanspruchung auch zusätzlich mit der für harte Werkstoffe ungünstigen Biegebeanspruchung belastet. Der Verschleiß der Werkzeugspitze ist damit deutlich höher. Schneidende Werkzeuge sind somit für den Abtrag von sehr harten Materialien ungeeignet. Im Vergleich zu den senkrecht eindringenden Werkzeugen sind schneidende Werkzeuge permanent im Eingriff mit dem Material, was zu einer verschleißfördernden Erwärmung des Werkzeugs und zu einem einseitigen Verschleiß der Werkzeugspitze führt. Die Richtung der Kraftwirkung beeinflusst auch die Beanspruchung im Material, obwohl bei beiden

⁶Drehschlagbohren: Beim hydraulischen Drehschlagbohren wird die Bohrkronen mit hohen Druckkräften von mehreren Kilo Newton auf das Gestein gedrückt. Gleichzeitig wird eine kontinuierliche Drehbewegung vollführt, sodass die Bohrkronen permanent in Kontakt mit der Bohrsohle steht. Durch die Trennung des Dreh- und des Schlagwerkes wird auch beim Drehen Lösearbeit durch Abscheren verrichtet [Kur-96].

⁷Schlagbohren: Anders als beim Drehschlagbohren ist die Bohrkronen nicht auf Druck beaufschlagt. Die Drehbewegung verrichtet damit keine Lösearbeit.

Verfahren Zugkräfte die eigentliche Ursache des Abtrags darstellen. Bei schneidenden Verfahren ist die Belastung des Materials direkt auf Zugspannung, während bei dem senkrecht eindringenden Verfahren die Zugbelastung einer zunächst wirkenden Druckbelastung folgt. Im direkten Vergleich zu einem eindringenden Verfahren sind daher die benötigten Kräfte für einen Abtrag bei schneidenden Verfahren niedriger [Ram-10]. Die Verringerung der Kräfte beim Abtrag ist bei jedem Verfahren ein wichtiges Ziel zur Steigerung der Effizienz. Durch die konstruktive Gestaltung der geometrischen Größen eines Werkzeugs wie der Freiwinkel⁸ oder die Anstellung der Werkzeuge können auftretende Reibungen und damit die erforderlichen Kräfte zusätzlich verringert werden. Die Kombination beider Verfahren ermöglicht, die jeweiligen Vorteile zu nutzen, um zum einen die benötigten Abtragkräfte zu reduzieren und zum anderen den Verschleiß der Werkzeugspitzen gering zu halten. Bei dem Verfahren Oscillating Disc Cutter (ODC) wird der Vorteil einer stabil ausgeführten und rotierenden Werkzeugschneide wie bei einem senkrechtwirkenden Eindringverfahren mit den Vorteilen der geringeren Kräfte bei einem schneidend arbeitenden Verfahren kombiniert. Das parallel zur Oberfläche abtragende Verfahren ermöglicht nicht nur eine Verringerung der benötigten Kräfte beim Abtrag, sondern auch eine Verringerung des Werkzeugverschleißes.

Genauso wie die Krafrichtung ist die Kraftwirkung auf das Material ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal. Die Wirkung der auf der Materialoberfläche aufgebrachten Kräfte ist bei allen Werkzeugen entweder linien- oder punktförmig ausgeprägt. Beim Unterscheidungsmerkmal Kraftwirkung wird daher zwischen punktförmig wirkenden Werkzeugen oder linienförmig wirkenden Werkzeugen unterschieden. Punktförmig wirkende Werkzeuge werden vor allem bei sehr harten Materialien eingesetzt, da dort die Belastung aufgrund der punktuellen Konzentration der Kraft sehr groß sein kann. Je nach Einsatzgebiet ergeben sich dabei unterschiedliche Vor- und Nachteile. Beim Fräsen von spröden Werkstoffen mittels eines Rundschaftmeißels führt die punktuelle Bearbeitung des Materials zu einem kleinen Abtragsvolumen, bezogen auf die Größe der Schneide. Der Energieaufwand für den Abtrag ist daher sehr groß. Dies zeigt sich auch in der kleinstückigen Fragmentierung des abgetragenen Materials. Vorteilhaft wirkt sich hierbei der geringere Verschleiß bei der kegelförmigen und damit verschleißresistenten Werkzeuggeometrie aus. Im Vergleich zu den punktförmig angreifenden Werkzeugen sind bei linienförmig wirkenden Materialien größere Fragmentstücke aufgrund der größeren Schneide und des größeren Wirkbereichs zu erwarten. Oft wird diese Art von

⁸Bei schneidenden Verfahren ist der Freiwinkel der Winkel zwischen der Werkzeugschneide und der Materialoberfläche und beeinflusst die Reibung zwischen diesen Flächen. Der zunehmende Verschleiß des Werkzeugs ist mit einem abnehmenden Freiwinkel verbunden.

Werkzeugen für den schneidenden Abtrag von Materialien von geringerer Härte eingesetzt. Der Abbau von Kohle beispielsweise erfolgt schneidend durch einen Hobelmeißel. Um den Vorteil eines größeren spezifischen Abtragsvolumens, bezogen auf eine Schneide bei linienförmig wirkenden Werkzeugen, auch bei harten Materialien zu nutzen, sind hohe Druckkräfte durch schwere Maschinenteknik notwendig. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von Schneiddisken im Hartgestein beim Einsatz einer Tunnelbohrmaschine. Die eingesetzten Schneiddisken rollen auf der Oberfläche ab und brechen das Material aufgrund von hohen Druckkräften, die linienförmig in das Material eingebracht werden. Es existieren verschiedene Ausführungen von Werkzeugen dieser Art, die aufgrund ihrer Bewegung der Gruppe der Rollenmeißel zugeordnet werden kann. Rollenmeißel sind in verschiedensten Ausführungen wie zum Beispiel Disken, Zahnrollen, Warzenrolle etc. für die unterschiedlichsten Einsatzgebiete optimiert. Vorteilhaft wirkt sich hierbei die robuste Technik und durch die abrollende Bewegung der gleichmäßig auf die Werkzeugspitzen verteilte Verschleiß aus.

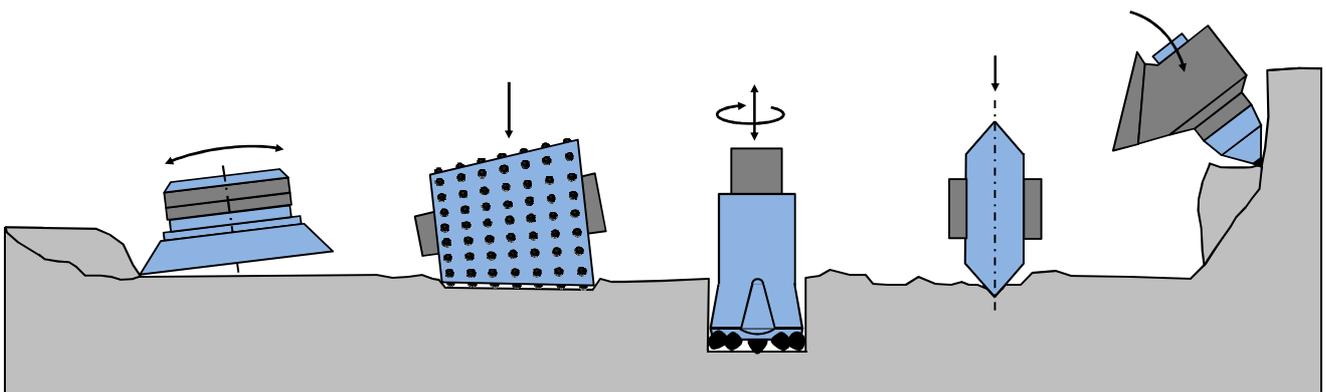


Abbildung 11: Symboldarstellungen von Abtragverfahren (von links nach rechts): Oscilating Disc Cutter (ODC), Warzenrolle, Drehschlagbohren, Schneiddiske, Rundschafftmeißel

Das dritte Unterscheidungsmerkmal in Tabelle 3 ist die Art der Krafteinbringung, die entweder durch eine quasistatisch aufbauende Kraft oder dynamisch durch den Eintrag eines Kraftimpulses in das Material erfolgen kann. Die dynamische Krafteinbringung in ein Material kann in Abhängigkeit der Auftreffgeschwindigkeit zu Effekten führen, die zur Steigerung der Festigkeitseigenschaften des Abtragmaterials führen können. Bei hohen Auftreffgeschwindigkeiten wie zum Beispiel bei einem Flugzeugaufprall (100 – 250 m/s) oder einem Beschuss mit konventionellen Waffen (1000 – 3000 m/s) können bei Betonen hohe Dehnraten ($10^0 - 10^2$ 1/s beziehungsweise $10^4 - 10^6$ 1/s) auftreten, die zu einer Verfestigung des Materials führen können [Ort-06] [Nöl-10]. Die Ursache für die bei hohen Dehnraten vorliegende Verfestigung liegt in der Rissbildung im Gefüge, die an mehreren Stellen auftritt und nicht wie beim Bruch unter quasistatischer Belastung an der schwächsten Stelle stattfindet und

von dort aus weiter wächst. Die gleichzeitige Bildung von Rissen im Material bei sehr hohen Dehnraten führt dazu, dass die in Abschnitt 2.3.1 definierte theoretische Festigkeit des Materials annähernd erreicht werden kann. Dabei bilden sich gleichzeitig viele Risse im unbeschädigten Materialgefüge, indem die atomaren Verbindungen des Gefüges zerstört werden. Die Bildung vieler Risse im Material zeigt sich auch beim Bruchbild wieder. Im Vergleich zum Bruch unter quasistatischer Belastung ist der fragmentierte Materialanteil deutlich größer [Qia-09] [Doa-09]. Die dehnratenabhängige Festigkeitssteigerung zeigt sich besonders bei heterogenen Werkstoffen wie Beton, bei denen das Risswachstum durch die Zuschlagsstoffe hindurchgeht und nicht an den Korngrenzen entlang erfolgt, wie es beim Spröbruch bei kleinen Dehnraten der Fall ist. Da die Zuschlagsstoffe eine größere Festigkeit aufweisen als die sie umgebende Zementsteinmatrix, sind hierzu größere Kräfte zum Durchtrennen der Verbindung notwendig. Beim Aufprall eines Werkzeugs mit hoher Aufprallgeschwindigkeit zeigt sich daher eine Steigerung der Festigkeit des Materials aufgrund der im Materialgefüge eingebrachten hohen Dehnraten [Ort-06].

Nach Rinehart [Rin-64] können impulsartige Belastungen, die zum Beispiel durch einen Einschlag auf der Materialoberfläche hervorgerufen werden, wiederum zu Druckwellen führen, die durch das Material wandern und bei Ankunft an einer freien Materialoberfläche reflektiert werden. Die reflektierte Welle bewegt sich durch das Material zurück und verursacht Zugspannungen im Materialgefüge. An der freien Oberfläche kann es zu Interferenzen zwischen der ankommenden Druckwelle und der gleichzeitig reflektierten Druckwelle kommen, wodurch große Spannungen und Schädigungen im Materialgefüge entstehen können. Dieser Vorgang ist besonders bei spröden Materialien wie zum Beispiel Gesteinen zu bemerken, die anfällig auf Zugbeanspruchung reagieren. Dort können die Zugspannungen durch die reflektierte Druckwelle zu Abplatzungen an der Oberfläche führen, obwohl die Druckwelle im Material keine Schäden verursacht hat. Bei den dynamischen Abtragverfahren wird in der Regel die impulsartige Krafteinbringung mit einer zyklischen Beanspruchung kombiniert. Das Material wird dabei einer sich wiederholenden Belastung ausgesetzt. Der Schädigungsmechanismus verläuft bei der zyklisch-dynamischen Beanspruchung wie zum Beispiel bei dem Verfahren Drehschlagbohren ähnlich wie bereits erläutert. Ausgehend von einer Zermalmungszone unmittelbar unterhalb der Bohrkronen bilden sich im Material Radialrisse. Bei weiterer Belastung kommt es zur Bildung von neuen Rissen und zum Wachstum von vorhandenen Rissen, bis der Bruch im Material durch das Herausbrechen von Materialstücken eintritt [Kur-96].

Mithilfe der drei Unterscheidungsmerkmale Kraftwirkung, Krafrichtung und Krafteinbringung kann qualitativ die Belastung durch ein Werkzeug auf Material beschrieben werden. Die

quantitative Höhe der tatsächlich eingebrachten Beanspruchung in das Material hängt von verschiedenen Parametergrößen und den gegebenen Randbedingungen des Materials ab. Zu berücksichtigen ist hierbei die Tatsache, dass die Werkzeugspitze die Belastung in Intervallen in das Material einbringt. Die Oberfläche eines spröden Materials verändert sich dabei nach jedem Abtrag individuell, sodass immer eine andere Randbedingung für das Werkzeug nach einer Abtragung vorliegt. Damit ist nicht nur der Beanspruchungszustand im Material, sondern auch der sich ergebende Abtrag durch einen Werkzeugkontakt quantitativ nicht vorher bestimmbar. Quantitative Werte zur Leistung eines Verfahrens lassen sich daher nur als gemittelte Werte angeben [Rox-73]. Dagegen ist die vom Werkzeug zur Verfügung gestellte Belastungsart und Belastungsintensität gut definierbar und stellt eine wichtige Charakterisierungsgröße für ein Verfahren dar. Im Wesentlichen hängt diese von dem Werkzeugträger, der Werkzeuggeometrie und den vorherrschenden Randbedingungen ab. Mit der Kenntnis über die vom Werkzeugträger zur Verfügung gestellte Belastung und die Einflussmöglichkeiten kann der im Material hervorgerufene Beanspruchungszustand abgeschätzt und angepasst werden, damit ein gewünschter Abtrag realisiert werden kann.

2.3.4 Fazit zum Bruchverhalten spröder Stoffe

Bei der Dimensionierung von Bauteilen spielen der klassische Festigkeitsnachweis und die Bruchnachweise eine wichtige Rolle. Bauteile werden dimensioniert, um die auftretenden Belastungen aufnehmen zu können, ohne dass ein Versagen auftritt. Abtragverfahren haben zum Ziel, ein Versagen in Materialien herbeizuführen. Das Versagen und damit die Zerstörung des Stoffgefüges sind bei spröden Materialien von verschiedenen Größen wie Geometrie, Werkstoff sowie von der Art und Höhe der auftretenden Belastungen abhängig. All diese Größen beeinflussen den Beanspruchungszustand im Material. Ist die äußere Belastung ausreichend groß, so beginnt das Versagen an Materialfehlern im Stoffgefüge, weil es dort zu einer Spannungsüberhöhung kommt. Materialfehler wie zum Beispiel Risse sind im Gefüge eines spröden Materials in verschiedenen Orientierungen vorhanden. Die äußere Belastung führt dazu, dass einige dieser Risse sich schließen. Andere Risse wiederum beginnen, sich weiter zu öffnen, und wachsen zusammen, bis eine kritische Größe erreicht ist, sodass es zu einem instabilen Risswachstum und damit zum Bruch kommt. Ziel eines Verfahrens für den Abtrag und damit des Zerstörens eines Stoffgefüges ist daher die Einbringung einer Belastung beziehungsweise eines Spannungszustandes, wodurch die Rissbildung und das Risswachstum begünstigt werden. Die Art und Wirkungsweise der Belastung muss zur Überschreitung einer werkstoffspezifischen Größe beitragen, damit der Zerstörungsprozess eingeleitet werden kann. Mechanische Verfahren dringen dabei mit der Werkzeugspitze in die Materialoberfläche hinein

und rufen dort einen Beanspruchungszustand hervor. Zur Ermittlung der benötigten Kräfte für ein definiertes Eindringen existieren für unterschiedliche Werkzeuggeometrien analytisch hergeleitete Formeln. Mit ihnen kann zum Beispiel für eine Werkzeuggeometrie und eine Eindringtiefe die benötigte Kraft bestimmt werden. Aufgrund der inhomogenen Gefügestruktur eines spröden Werkstoffes, des rissbasierten Versagensmechanismus und sich ändernder Randbedingungen beim Abtrag erlauben die theoretisch hergeleiteten Formeln nur eine grobe qualitative Abschätzung der Kräfte. Die tatsächliche Größe der erforderlichen Kraft lässt sich damit nicht vorherbestimmen. Verlässliche Angaben zur Bestimmung der eingebrachten Beanspruchung eines Materials durch ein Abtragverfahren können mithilfe experimenteller Untersuchungen gewonnen werden. Dabei ist die zur Verfügung gestellte Belastung durch das Abtragverfahren eine typische Größe und stellt das wichtigste Charakterisierungsmerkmal dar.

Die Kenntnis über die bereitgestellte Belastung ist für das Verständnis eines Abtragverfahrens fundamental, da sie die Ursache für den Abtrag des Materials darstellt. In Kapitel 5 wird daher eine Methodik entwickelt, mit deren Hilfe die Beanspruchung im Rohr für ein mechanisches Abtragverfahren erfasst wird. Ziel ist es, daraus die bereitgestellte Belastung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Schlagverfahrens zu erfassen und diese mathematisch in Abhängigkeit der Einflussfaktoren zu beschreiben.

3 Problemabstraktion und Zielsetzung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen eines neuen Abtragverfahrens für die Entfernung von Ablagerungen aus Rohren vorgestellt, das dann im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher untersucht wird. Zunächst wird hierzu eine Bewertung von verschiedenen Verfahrensprinzipien anhand einer Nutzwertanalyse durchgeführt und aus diesen eines ausgewählt. Anschließend werden mögliche Wirkmechanismen für dieses Verfahrensprinzip vorgestellt und aufbauend auf den Erkenntnissen von Kapitel 2 diskutiert. Um die unterschiedlichen Wirkmechanismen miteinander vergleichen zu können, erfolgt zuerst eine Problemdefinition. Hierbei werden die wesentlichen Randbedingungen des Problems – nämlich die Entfernung der Ablagerungen in Rohrleitungen – analysiert, sodass anschließend Kriterien für die Bewertung der Wirkmechanismen aufgestellt werden können. Die anschließende Bewertung soll das Potential eines Wirkmechanismus aufzeigen, das dann im Rahmen dieser Arbeit detaillierter untersucht werden soll. Am Ende dieses Kapitels wird zusammenfassend die Zielsetzung und die weitere Vorgehensweise der Arbeit vorgestellt.

3.1 Bewertung von Verfahrensprinzipien

Die meisten Abtragverfahren basieren auf mechanischen, chemischen oder thermischen Verfahrensprinzipien. Jedes dieser drei Verfahrensprinzipien hat Vor- und Nachteile. Die Entscheidung über die Eignung eines Verfahrensprinzips für eine Anwendungsaufgabe wird anhand von Bewertungskriterien getroffen, die einen Vergleich und eine Bewertung der Verfahrensprinzipien untereinander ermöglichen. Die Bewertungskriterien lassen sich aus den Randbedingungen für eine sichere und effektive Rohrdekontamination ableiten. All diese Kriterien können den drei nachfolgenden Hauptgruppen zugeordnet werden:

- Umwelttechnische Kriterien
- Sicherheitsrelevante Kriterien
- Effizienz- und Effektivitätskriterien

Die Wirtschaftlichkeit und der finanzielle Aufwand der Verfahrensprinzipien werden im Rahmen dieser Beurteilung nicht gesondert berücksichtigt, da diese teilweise in den obengenannten Kriterien bereits vorhanden sind. Weiterhin hängen viele Kriterien auch von der jeweiligen Ausführungsform ab, sodass sie auf dieser allgemeinen Betrachtungsebene nicht berücksichtigt werden können.

Die Bewertung der Verfahrensprinzipien nach den **umwelttechnischen Kriterien** zeigt auf, welche Belastungen für die Umwelt durch ein Abtragverfahren aus dieser Gruppe zu erwarten

sind. Das allgemeine Ziel ist dabei, die Belastung für die Umwelt so gering wie möglich zu halten. Aufgrund existierender Auflagen des Gesetzgebers wirkt sich eine Nichteinhaltung dieser Kriterien direkt auf die Kosten der Abtragverfahren aus. Hierzu zählt beispielsweise die mit Kosten verbundene Entsorgung der kontaminierten Rückstände. Diese sind wiederum von der Menge sowie von der Aktivität der Rückstände abhängig. Verfahrensprinzipien, die mit Hilfsstoffen einen Abtrag der Ablagerungen verursachen, verteilen die Aktivität der Rückstände auf eine größere Abfallmenge, sodass die Aktivität im Mittel verkleinert wird. Da die Aktivität dieser Rückstände die Freigrenze meistens nicht unterschreitet, wird die Menge der kontaminierten Abfälle vergrößert. Sekundärabfall ist daher ein großer Nachteil, der zu den hohen Entsorgungskosten der radioaktiven Rückstände beiträgt. Ein weiterer Aspekt, der in diese Kategorie fällt, ist der aufzuwendende Energiebedarf der Abtragverfahren. Zu den energieintensiven Ausführungsformen zählen, wie bereits erwähnt, Abtragverfahren, die auf thermischen Verfahrensprinzipien beruhen.

Die **sicherheitsrelevanten Kriterien** beziehen sich vordergründig auf die Sicherheit und die Arbeitsbedingungen des Personals während der Dekontaminationsarbeiten. Der manuelle Umgang mit radioaktiven Stoffen führt zu einer Gefährdung des Bedienpersonals, da dies mit der Aufnahme einer Strahlendosis verbunden sein kann. Die Möglichkeit zur Fernhandlung oder Automatisierung eines Verfahrensprinzips ist daher wichtig. Zwar handelt es sich bei der Strahlung der mit NORM-Stoffen kontaminierten Ablagerungen hauptsächlich um leicht abschirmbare Alpha-Strahlungen, jedoch können diese durch mechanische Abtragung und der damit verbundenen Staubbildung mobilisiert werden und somit eine Gefahr darstellen. Im Falle einer Inkorporation von kontaminierten Stäuben kann es in dem Organismus zu einer Einlagerung kommen, wodurch auf lange Sicht Schäden im Zellgewebe hervorgerufen werden. Das Ziel jedes Abtragverfahrens sollte daher sein, dass ein unkontrolliertes Freisetzen der beim Prozess auftretenden Stäube verhindert wird. Mit einer erhöhten Staubbildung ist besonders bei mechanischem Abtrag von spröden Stoffen zu rechnen. Entsprechend müssen Maßnahmen getroffen werden, um ein unkontrolliertes Austreten von kontaminierten Stäuben zu verhindern. Darüber hinaus spielen bei manuellen Tätigkeiten die Arbeitsbedingungen für das Personal eine wichtige Rolle für die Beurteilung der Sicherheit. Hierzu zählen zum Beispiel die Belastungen des Personals durch Lärm, Vibrationen, Gase und extreme Temperaturen. Da diese Gefahren bei allen Abtragverfahren auftreten können und keine spezifische Eigenschaft eines Verfahrensprinzips darstellen, wird eine Bewertung nach diesen Kriterien nachfolgend nicht vorgenommen. Zudem lassen sich viele dieser Gefahren durch entsprechende Schutzmaßnahmen und durch Automatisierung auf ein unbedenkliches Maß reduzieren.

Bei der Bewertung der **Effizienz und Effektivität** geht es zum einen um die Realisierbarkeit einer praktikablen Ausführungsform des Verfahrensprinzips und zum anderen um die Bewertung der Leistungsfähigkeit. Die Beurteilung der Verfahrensprinzipien wird basierend auf den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Abtragverfahren durchgeführt. Kriterien, die hierbei eine wichtige Rolle spielen, sind zum einen der Zeitbedarf für den Abtrag und zum anderen der Verschleiß der Werkzeuge sowie der Bedarf an Hilfsstoffen. Dabei wirkt sich eine geringe Standzeit der eingesetzten Werkzeuge schlecht auf die Effizienz des Abtragverfahrens aus, da sie hohe Kosten verursacht und im schlimmsten Fall zu einer Belastung in Form von Sekundärabfall führt. Bei Verfahrensprinzipien, die Hilfsstoffe benötigen, ist zwar eine erneute Benutzung von Strahlmitteln vorstellbar, jedoch wird dies durch die Vermischung mit den gelösten Ablagerungen erschwert. Es ist dann ein zusätzlicher Aufwand durch eine Separierung der Strahlmittel von den Rückständen notwendig, wodurch das Abtragverfahren nicht mehr effizient ist.

Aus den oben aufgeführten drei Hauptgruppen lassen sich insgesamt fünf allgemeine Bewertungskriterien ableiten, anhand derer im Folgenden eine Bewertung der Verfahrensprinzipien durchgeführt werden soll. Der Bedarf an Hilfsstoffen ist ein wichtiges Kriterium, da diese, wie bereits erwähnt, mit Sekundärabfall verbunden sind und daher in der Bewertung berücksichtigt werden sollten. Das Kriterium der Leistungsfähigkeit wird anhand von Informationen aus der Literatur beziehungsweise des Abschnitts 2.2 bewertet, in dem Ausführungsformen verschiedener Verfahrensprinzipien vorgestellt werden. Die Bewertung nach diesem Kriterium erfolgt anhand einer fachlichen Einschätzung mit der Fragestellung, inwieweit eine Entfernung der Ablagerungen durch das jeweilige Verfahrensprinzip realisierbar ist. Wie bereits erwähnt, ist der Verschleiß ein weiteres wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Effizienz des Verfahrensprinzips und wird nachfolgend in der Bewertung mit berücksichtigt. Der Energiebedarf sowie der zeitliche Bedarf für eine Dekontaminationsaufgabe sind weitere Kriterien, die gleichwertig gewichtet werden. Der Zeitbedarf eines Abtragverfahrens wird nicht separat betrachtet, da dieser bereits durch das Kriterium der Leistungsfähigkeit berücksichtigt wurde. Beim letzten Kriterium handelt es sich um die Einschätzung der Effektivität des Verfahrensprinzips. Dieses fällt unter das Kriterium der Realisierbarkeit. Es wird hier eine fachliche Einschätzung darüber getroffen, inwiefern ein Abtragverfahren basierend auf dem Verfahrensprinzip umgesetzt werden kann.

In der nachfolgenden Tabelle 4 werden die drei Verfahrensprinzipien anhand der fünf Kriterien bewertet. Die Kriterien sind aufsteigend nach ihrer Wichtigkeit angeordnet. Sie geben die Anforderungen an ein neues Abtragverfahren wieder. Dabei werden die beiden Kriterien „hilfsstoffarm“ und „leistungsfähig“ stärker bewertet als die übrigen drei Kriterien. Der Grund

hierfür ist, dass diese beiden Kriterien aufgrund des verfügbaren Technikstands verlässlicher beurteilt werden können als die übrigen drei Kriterien, bei denen eine fachliche Einschätzung vorgenommen worden ist. In der Bewertungstabelle werden Strahlverfahren als eine zusätzliche Verfahrensgruppe aufgeführt, obwohl sie den mechanischen Verfahrensprinzipien zugeordnet werden. Es wird daher zusätzlich die Gruppe der „Mechanischen Verfahren mit Hilfsstoffen“ (Mechanisch + HS) in die Bewertungstabelle aufgenommen.

Die Nutzwertanalyse soll das Potential der verschiedenen Verfahrensprinzipien und die prinzipielle Eignung für den Einsatz in der Rohrdekontamination aufzeigen. Bei der Bewertung werden maximal drei Punkte für das Erfüllen eines Kriteriums vergeben. Aus der Summe der erreichten Punkte und unter Berücksichtigung der Gewichtung der einzelnen Kriterien wird das Potential eines Verfahrensprinzips berechnet.

Tabelle 4: Nutzwertanalyse für die Bewertung von Verfahrensprinzipien

Kriterium	Gewichtung	Mechanisch	Mech. + HS	Thermisch	Chemisch
Hilfsstoffarm	3	3	1	3	1
Leistungsfähig	3	2	3	1	1
Verschleißarm	2	2	1	3	1
Energiearm	2	3	2	1	2
Realisierbar	2	2	3	1	1
Potential	-	29	24	22	14

Das Ergebnis der Nutzwertanalyse sowie die Bewertung der Wirkprinzipien ist in Tabelle 4 aufgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein rein mechanisches Verfahren ein höheres Potential besitzt als die restlichen Verfahren. Unter anderem liegt dies an der guten Leistungsfähigkeit im Vergleich zu thermischen und chemischen Verfahren. Mechanische Verfahren mit Hilfsstoffen haben wie bei den chemischen Verfahren den Nachteil, dass Hilfsstoffe eingesetzt werden, um einen Abtrag zu realisieren. Zusätzlich kommt bei den chemisch arbeitenden Abtragverfahren nachteilig hinzu, dass sie eine geringere Leistungsfähigkeit im Vergleich zu den anderen Verfahren besitzen. Sie wirken nur langsam und sind daher nur für sehr dünne Ablagerungen sinnvoll einsetzbar. Das Kriterium „verschleißarm“ bezieht sich auf die Abnutzung und Erneuerung der eingesetzten Werkzeuge und Hilfsstoffe. Dieses ist bei den chemischen und mechanisch arbeitenden Verfahren mit Hilfsstoffen besonders schlecht ausgeprägt. Die verwendeten Hilfsstoffe unterliegen einer großen Abnutzung sowie einem großen Verschleiß, sodass ihre Wirkung bei einer Wiederbenutzung nach einer Reinigungsmaßnahme stark

eingeschränkt ist. Ähnlich ist es bei den chemischen Verfahren, bei denen die Chemikalien durch die Vermischung mit den Ablagerungsrückständen in ihrer Wirkung nachlassen. Bei thermisch arbeitenden Verfahren sind die eingesetzten Geräte nur einer thermischen Belastung ausgesetzt. Es ist hier von einer hohen Standzeit auszugehen. Dies ist auch bei den rein mechanischen Verfahren der Fall, bei denen die Werkzeuge gehärtet werden können und somit der Verschleiß auf ein Minimum reduziert werden kann. Der Energiebedarf ist bei thermischen Verfahrensprinzipien vergleichsweise groß. Dies betrifft auch den zeitlichen Bedarf der Dekontamination. Bei der Beurteilung der Realisierbarkeit eines neuen Abtragverfahrens schneiden die chemischen und thermischen Verfahrensprinzipien schlecht ab. Der Stand der Technik bietet hierzu im Vergleich zu den mechanischen Verfahren wenig effektive Lösungsmöglichkeiten.

Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse zeigen zusammengefasst, dass mechanische Verfahren für die Aufgabe am besten geeignet sind. Verfahren, die auf mechanischen Wirkprinzipien beruhen und dabei ohne Hilfsstoffe auskommen, sind besonders sinnvoll, da insbesondere die Problematik des Sekundärabfalls wegfällt. Thermische Verfahren benötigen einen hohen Energiebedarf und sind dadurch etwas schlechter in der Bewertung. Chemische Verfahren schneiden bei jedem Kriterium vergleichsweise schlecht ab. Sie sind daher für die Erfüllung der Aufgabe schlecht geeignet. Basierend auf den Ergebnissen dieser Nutzwertanalyse wird im Nachfolgenden ein mechanisches Verfahren ohne Hilfsstoffe ausgewählt. Mit diesem wird die Problematik der Sekundärabfälle auf ein Minimum reduziert. Da eine große Vielfalt an Ausführungsformen dieses Verfahrensprinzips existiert, werden im folgenden Abschnitt die Wirkprinzipien dieser Abtragverfahren analysiert. Das Ziel ist die Abschätzung des Potentials der jeweiligen Ausführungsformen für die Erfüllung der Anforderungen eines Abtrags unter den gegebenen Randbedingungen eines Rohrs. Hierzu werden zunächst die Randbedingungen für die Rohrdekontamination definiert und anschließend die Ausführungsformen vergleichend gegenübergestellt.

3.2 Wirkprinzipien von Abtragverfahren

In Abschnitt 2.1 wurde gezeigt, dass die Ablagerungen in den Rohrleitungen als ein sprödes Stoffsystem betrachtet und durch mechanische Kennwerte beschrieben werden können. Über einen Haftverbund ist dieses Stoffsystem mit einem zweiten elastischen Stoffsystem – dem metallischen Trägermaterial des Rohrs – verbunden. Das Rohr, in dem sich die Ablagerungen befinden, kann im Wesentlichen durch den Krümmungsradius beschrieben werden. Ziel eines Abtragverfahrens ist daher die Entfernung des spröden Stoffsystems von dem elastischen Trägermaterial unter den herrschenden Randbedingungen eines Rohrs. Zur Trennung dieser

Stoffsysteme existieren unterschiedliche Verfahrensprinzipien. Zum Beispiel kann die Entfernung der Ablagerungen durch eine direkte Krafteinwirkung erfolgen. Die sich daraus ergebenden Zerstörungsmöglichkeiten eines spröden Stoffsystems wurde in Abschnitt 2.3.1 ganz allgemein beschrieben. Demnach wird bei den meisten Verfahren ein Abtrag durch die Einbringung von Kräften beziehungsweise Spannungen im Stoffsystem erzeugt. Diese tragen ihrerseits zu Dehnungen im Stoffgefüge bei, die beim Erreichen der Bruchgrenze zu Rissen und damit zu der gewünschten Schädigung führen. Die nachfolgende Abbildung 12 zeigt grafisch vereinfacht die Problematik der Ablagerungen in Rohrleitungen. Neben den beiden Stoffsystemen sind die Möglichkeiten zur Einbringung von Kräften durch ein Abtragverfahren anhand von Pfeilen dargestellt. Hierbei wird zwischen Normal- und Querkräften sowie einer Kombination der beiden Kräfte unterschieden.

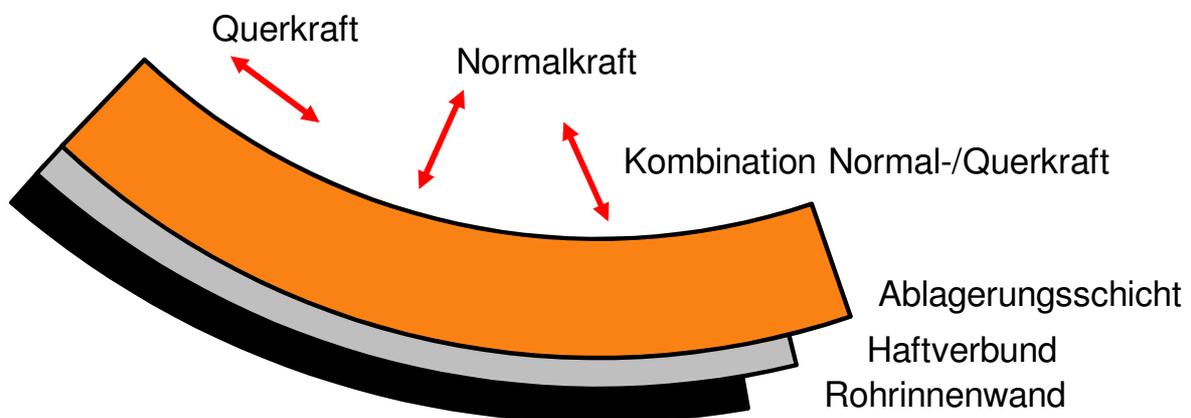


Abbildung 12: Vereinfachtes Modell eines Rohrstücks mit einer Ablagerungsschicht, einem Haftverbund und den Möglichkeiten zur Einbringung von Kräften zur Zerstörung des Stoffsystems

Bei mechanischen Verfahren werden die dargestellten Kräfte mithilfe von Werkzeugen in das Stoffsystem eingebracht. Hierzu existieren unterschiedliche Ausführungsformen von Abtragverfahren, die unterschiedlichen Wirkprinzipien zugeordnet werden. Ein Abtrag kann beispielsweise durch das direkte Zerstören des Haftverbundes erfolgen, die direkte Zerstörung der Ablagerungen oder eine Kombination dieser beiden Wirkmechanismen. In der Regel basieren die meisten Verfahren auf der Zerstörung des Ablagerungsgefüges, indem dieses von der zugänglichen Seite – der sichtbaren Oberfläche – bis zur Innenfläche des Rohrs allmählich abgetragen wird.

Um die unterschiedlichen Möglichkeiten von Abtragverfahren, die in Abschnitt 2.2 diskutiert wurden, an dem konkreten Problem der Entfernung der Ablagerungen zu verdeutlichen, wurde das Stoffsystem bestehend aus Ablagerungen und Haftverbund in Abbildung 13 anhand eines Gitternetzmodells abstrahiert. An diesem Modell können nun vereinfacht die Wirkmechanismen

der verschiedenen Abtragverfahren diskutiert werden. Der in Abbildung 13 gezeigte Wirkmechanismus zerstört die Ablagerungsschicht schrittweise, von der Oberfläche bis zum Trägermaterial. Mögliche Ausführungsformen dieses Wirkmechanismus sind die mechanischen Verfahren wie das Schleifen, Fräsen oder diverse Strahlverfahren. Je nach Dicke der Ablagerungen sind mehrere Zyklen erforderlich, damit die Ablagerungen bis zum Trägermaterial entfernt werden können.

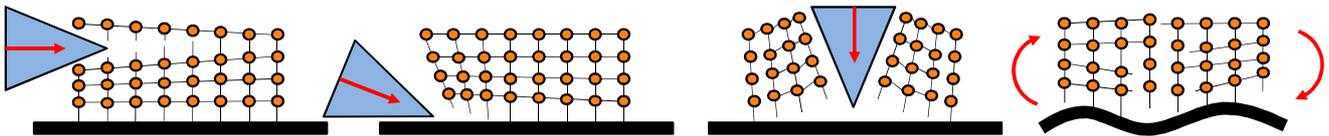


Abbildung 13: Gittermodell zur Veranschaulichung der Wirkmechanismen von Abtragverfahren, von links: a) Schichtweises Zerstören der Ablagerungen, b) Zerstören des Haftverbundes, c) Zerstören der Ablagerungen durch senkrecht einwirkendes Eindringen, d) Zerstören durch Dehnung im Trägermaterial

Der zweite Mechanismus in Abbildung 13 b zeigt ein Abtragen durch das direkte Angreifen des Haftverbundes. Verfahren, die auf diesem Wirkprinzip basieren, sind Abtragverfahren durch Schaben, Bohren und teilweise auch durch Fräsen. Bei diesen Verfahren gleitet die Werkzeugschneide permanent auf das Trägermaterial und zerstört beim Auftreffen auf die Ablagerung den Haftverbund.

Abtragverfahren, die die Ablagerungsschicht hauptsächlich senkrecht zum Trägermaterial angreifen und die Ablagerungsschicht durch Eindringen zerstören, sind beispielsweise Schlagverfahren. Diese beruhen auf dem Prinzip des Hammers und des Meißels. Dieses Wirkprinzip ist in Abbildung 13 c aufgezeigt.

Für die aufgezählten Wirkmechanismen wird zur Realisierung des Abtrags jeweils ein Abtragwerkzeug in Form einer Schneide oder entsprechender Hilfsstoffe benötigt. Neben den aufgezählten direkten Möglichkeiten der Entfernung von Ablagerungen gibt es die Möglichkeit der indirekten Zerstörung durch die Erzeugung von Dehnungen und Verformungen im Trägermaterial, das in Abbildung 13 d dargestellt ist. Neben der mechanischen Erzeugung der Dehnungen im Trägermaterial können diese auch mithilfe eines thermischen Verfahrens erzielt werden. Durch den Einsatz von Wärme werden aufgrund verschiedener Wärmeausdehnungskoeffizienten der Stoffsysteme unterschiedliche Dehnungen erzeugt und damit indirekt der Haftverbund angegriffen. Die in Abschnitt 2.3.3 diskutierte Möglichkeit der Einbringung von Druckwellen in das Ablagerungsmaterial und der Schädigung durch Erzeugung von Zugspannungen an der Grenzschicht stellt eine weitere Option dar, die zu dieser Gruppe der Abtragverfahren hinzugezählt werden kann.

Die meisten in der praktischen Anwendung zum Einsatz kommenden Verfahren lassen sich auf die in Abbildung 12 gezeigten Wirkprinzipien zurückführen. Es ist auch eine Kombination der genannten Wirkprinzipien untereinander möglich. Die Vor- und Nachteile der genannten Ausführungsformen werden im nächsten Abschnitt anhand der praktischen Durchführbarkeit unter anzutreffenden Randbedingungen wie der Bauraumbedarf bewertet und eine Ausführungsform ausgewählt. Basierend darauf werden die in Abschnitt 3.2 häufig eingesetzten Ausführungsformen bewertet und miteinander verglichen. Die dafür benötigten Kriterien leiten sich aus den zu definierenden Randbedingungen ab, die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

3.3 Auswahl eines Abtragverfahrens

Nachfolgend werden die Verfahren Abtragen durch Schaben, Schleifen, Bohren sowie Abtrag durch Schlag miteinander verglichen. Das Bohrverfahren schließt ähnlich arbeitende Verfahren wie zum Beispiel das Fräsen oder Bürsten und Verfahren mit einer geometrisch definierten Schneide mit ein. Der Vergleich und die Bewertung dieser Ausführungsformen erfolgt ähnlich wie bei den Verfahrensprinzipien anhand einer Nutzwertanalyse. Die hierbei berücksichtigten Kriterien werden im Folgenden vorgestellt. Zur weiteren Diskussion werden die genannten Ausführungsformen in zwei Gruppen eingeteilt: zum einen in Verfahren, die die Oberfläche der Ablagerungen gleichmäßig abtragen, und zum anderen in Verfahren, die die Oberfläche ungleichmäßig bearbeiten. Zur ersten Gruppe zählen die Abtragverfahren Schaben, Schleifen und Bohren. Das Werkzeug dieser Verfahren bearbeitet die Oberfläche in der Regel mithilfe einer Werkzeugschneide. Bei idealen Bedingungen werden die Ablagerungen an der Kontaktstelle Werkzeugschneide und Ablagerung entfernt. Damit kann je nach Ausführungsform ein gleichmäßiges Abtragergebnis erreicht werden. Das Abtragverfahren mittels Schlag zählt zu der Gruppe der ungleichmäßig arbeitenden Verfahren. Durch den Einschlag einer Masse auf der Oberfläche wird ein Bruch in dem Material erzeugt, der nicht gesteuert werden kann und damit zu einem ungleichmäßigen Bearbeitungsergebnis führt. Ein Verfahren der Gruppe 1, das eine gleichmäßige Bearbeitung der Oberfläche ermöglicht, lässt eine Abschätzung des Bearbeitungsergebnisses zu. Diese ist vor allem für die Randbedingungen eines Rohrs hilfreich, da keine unmittelbare Zugänglichkeit zur Kontrolle des Abtragergebnisses gegeben ist. Die gleichmäßige Bearbeitung einer Oberfläche durch Verfahren der Gruppe 1 erfordert einen permanenten Kontakt der Werkzeugschneide mit der Ablagerung. Mögliche Nachteile, die konstruktiv in Betracht gezogen werden müssen, sind die dabei entstehende Wärmeentwicklung innerhalb des Werkzeugs und die Verschleißerscheinungen aufgrund der längeren Eingriffszeit der Werkzeugschneide.

Eine der wichtigsten Randbedingungen, unter denen der Abtrag stattfinden sollte, ist die des Bauraums. Die Ablagerungen befinden sich in Rohren, bei denen eine Zugänglichkeit des Werkzeugträgers nur durch zwei Rohrenden möglich ist. Die Größe des eingesetzten Werkzeugs ist durch den Rohrdurchmesser begrenzt. Bei der Erdölförderung werden beispielsweise Rohre des Typs 2 7/8" mit einem Innendurchmesser von circa 62 mm häufig eingesetzt. Aufgrund dieses kleinen Durchmessers sollte der Bauraumbedarf eines Abtragverfahrens möglichst klein sein. Erschwerend kommt hinzu, dass die Art der Ablagerungen und ihr geometrischer Aufbau über die Rohrlänge hinweg variieren können. Die daraus abgeleiteten Anforderungen an ein Abtragverfahren sind damit zum einen ein Abtrag unter beengtem Raum und zum anderen eine Flexibilität bei der Anpassung an die sich ändernden Randbedingungen. Des Weiteren verlieren die Rohre nach mehrjährigem Einsatz aufgrund von Deformationen und Korrosionsvorgängen ihre ursprüngliche Form. Ein Abtragverfahren, das nur unter definierten Bedingungen effektiv arbeiten kann, kann unter diesen Randbedingungen nicht mehr zuverlässig eingesetzt werden. Daher sollte der Toleranzbedarf eines Abtragverfahrens so klein wie möglich sein.

Der bei der Dekontamination von Rohren nur begrenzt zur Verfügung gestellte Bauraum begünstigt ein Verfahren, das keinen permanenten Kontakt mit der Rohrinnenfläche benötigt. Ein relativ kleines Bearbeitungswerkzeug kann flexibel auf die sich ändernden Randbedingungen wie beispielsweise Toleranzen in Rohren oder unterschiedliche Ablagerungsdicken reagieren. Die Werkzeuge vieler Abtragverfahren, besonders der Gruppe 1, benötigen sogar ein leichtes Übermaß⁹, um die Ablagerungen effektiv entfernen zu können. Durch das einkalkulierte Übermaß kann es zu einem Abtrag des Trägermaterials kommen und der Verschleiß des Werkzeugs negativ beeinflusst werden. Eine andauernde Berührung der Abtragoberfläche ist bei allen aufgeführten Verfahren, außer bei dem Abtragverfahren durch Schlag, wichtig. Dieses Verfahren erfordert ein Spiel zwischen der abzutragenden Oberfläche und der Werkzeugkante. Entsprechend werden in der Nutzwertanalyse, dargestellt in Tabelle 5, Abtragverfahren schlechter bewertet, die eine kontinuierliche Bearbeitung der Oberfläche benötigen.

In der folgenden Nutzwertanalyse werden die Toleranz sowie der Verschleiß nicht so stark gewichtet wie ein gleichmäßiger Abtrag, Bauraumanspruch und eine hohe Flexibilität.

⁹Das Übermaß ist die geometrische Überschneidung der Schneide des Werkzeugs und des Trägerwerkstoffs. Beim Bohren mit Übermaß ist der Durchmesser der Schneiden größer als der Rohrinne Durchmesser. Dies hat zur Folge, dass auch das Trägermaterial aufgebohrt wird. Besonders unflexible Verfahren benötigen bei toleranzbehafteten Rohren ein Übermaß, um eine vollständige Entfernung der Ablagerungen zu gewährleisten.

Tabelle 5: Nutzwertanalyse zur Bewertung von Abtragmechanismen

Kriterien	Gewichtung	Schlag	Schleifen	Schaben	Bohren
Gleichmäßiger Abtrag	3	2	3	3	3
Kleiner Bauraumbedarf	3	3	2	1	1
Hohe Flexibilität	3	3	3	2	2
Geringer Toleranzbedarf	2	3	2	2	1
Verschleißarm	2	3	1	2	2
Potential	-	36	30	26	24

Gemäß der Nutzwertanalyse sind Bohrverfahren nicht robust, da die geometrisch definierte Schneide nur unter idealen Randbedingungen effizient eingesetzt werden kann. Abweichungen im Rohrdurchmesser können durch die in der Regel starre Werkzeugausführung nicht ausgeglichen werden. Zudem ist der Bauraumbedarf bei dieser Art des Abtragverfahrens durch das permanent erforderliche Berühren der Rohroberfläche vergleichsweise groß. Abweichungen im Trägermaterial können deshalb durch eine starre Bauform nicht berücksichtigt werden. Demnach ist auch der Toleranzbedarf entsprechend hoch. Dagegen kann die Oberfläche gleichmäßig bearbeitet werden und ist daher positiv bewertet worden.

Schabende Abtragverfahren greifen den Haftverbund direkt an und müssen sich daher auf der Oberfläche des Trägermaterials bewegen können. Wegen der dort auftretenden Reibung ist mit einem großen Verschleiß der Werkzeugschneide zu rechnen. Aufgrund der Bewegung auf der Trägermaterialoberfläche können Abweichungen in Form von Deformationen nur bedingt ausgeglichen werden. Der Toleranzbedarf liegt daher im mittleren Bereich.

Bei schleifenden Abtragverfahren geschieht der Abtrag über eine geometrisch unbestimmte Schneide. Der Abtrag kann zum Beispiel beginnend von der Oberfläche in Richtung Trägermaterial erfolgen. Der Energieeintrag, die Wärmeentwicklung und der Verschleiß des Werkzeugs sind dabei vergleichsweise hoch. Die Werkzeugausführung kann flexibel gestaltet werden und ist nicht an eine starre Form gebunden. Der Bauraumanspruch wird als mittelmäßig hoch und die schleifende Bearbeitung der Ablagerungen als sehr robust¹⁰ angesehen.

Gemäß der Nutzwertanalyse hat das Abtragverfahren durch Schlagbeanspruchung das größte Potential, die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Die Vorteile des Verfahrens folgen primär

¹⁰Die Fähigkeit zur Anpassung an sich ändernde Randbedingungen sowie eine geringe Anfälligkeit für Toleranzen.

daraus, dass die geometrisch bestimmte Schneide des Bearbeitungswerkzeugs keines permanenten Kontakts mit der Bearbeitungsoberfläche bedarf. Das Werkzeug benötigt hierbei einen kleineren Bauraum als den zur Verfügung stehenden Raum im Rohr. Die Toleranzen in der Rohrgeometrie haben dadurch eine geringe Relevanz für den Abtragsvorgang, wodurch ein robustes Verfahren gegeben ist. Darüber hinaus führt der nicht permanent vorherrschende Kontakt mit der Abtragfläche aufgrund der schlagenden Bewegung zu kleineren Verschleißerscheinungen an der Werkzeugkante. Zusätzlich wird der Verschleißwiderstand, wie in Abschnitt 2.3.2 dargelegt, aufgrund der senkrechten Kräfteinbringung in die Ablagerungen begünstigt. Der Nachteil eines Abtrags durch Schlagbeanspruchung liegt in der ungleichmäßigen Bearbeitung der Oberfläche aufgrund des unbestimmten Schlageintrags. Es müssen daher Maßnahmen getroffen werden, die trotz der ungleichmäßigen Bearbeitung der Abtragfläche in der Summe einen kontinuierlichen Abtrag garantieren.

Das Ergebnis der Nutzwertanalyse zeigt, dass das Schlagverfahren das größte Potential besitzt, die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Das Abtragverfahren zeichnet sich durch eine robuste Bauweise aus, die durch einen geringen Toleranzbedarf, eine hohe Flexibilität sowie einen guten Verschleißwiderstand gekennzeichnet ist. Da ein Schlagverfahren für den Abtrag von Rohrablagerungen aus der Literatur bisher nicht bekannt ist, soll im Rahmen dieser Arbeit grundsätzlich die Durchführbarkeit eines Schlagverfahrens für die Rohrdekontamination untersucht werden. Dazu wird im Folgenden die Zielsetzung und die weitere Vorgehensweise für diese Arbeit vorgestellt.

3.4 Zielsetzung und weitere Vorgehensweise

Die bisher zum Einsatz kommenden Verfahren zur Entfernung von kontaminierten Ablagerungen basieren vor allem auf unterschiedlichen Strahlverfahren (Hochdruckwasserstrahlen, Sandstrahlen etc.) mit dem Nachteil, dass große Mengen an kontaminiertem Sekundärabfall anfallen. Die Ergebnisse aus Abschnitt 3.2 haben gezeigt, dass unterschiedliche mechanische Verfahren existieren, die prinzipiell geeignet wären, eine Entfernung der Ablagerungen auch ohne Hilfsstoffe durchzuführen. Dabei hat sich im vorherigen Abschnitt gezeigt, dass ein Abtragverfahren mittels Schlagbeanspruchung Vorteile gegenüber anderen mechanischen Verfahren aufweist. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher untersucht werden, inwieweit ein Schlagverfahren für die vorliegende Aufgabe der Rohrdekontamination geeignet ist. Hierzu soll unter den geltenden Randbedingungen eines Rohrs und der Ablagerungen ein Konzept für ein mechanisches Abtragverfahren entwickelt werden. In Abschnitt 2.3.2 wurde aufgezeigt, dass mechanische Verfahren im Allgemeinen einen Abtrag durch die Erzeugung einer Beanspruchung im Material ermöglichen. Diese erfolgt in der Regel durch den Eintrag einer

Belastung in Form von Kräften in das abzutragende Material. Um ein mechanisches Abtragverfahren zu beschreiben, ist daher die Erfassung dieser Belastung die charakterisierende Größe. Somit soll in dieser Arbeit die Erfassung dieser Größe unter der vorherrschenden Randbedingung eines Rohrs für ein neues Schlagverfahren erfolgen. Dabei sollen alle wichtigen Einflussfaktoren berücksichtigt werden, die den Beanspruchungszustand definieren. Die Erfassung des Beanspruchungszustands soll mit geeigneter Technik und Methodik erfolgen, sodass die Beeinflussungsmöglichkeiten aufgezeigt werden können. Ausgehend von der grundlegenden Beschreibung des Verfahrens soll anschließend die konstruktive Gestaltung in Form eines Prototyps erfolgen. Dieser soll dann in experimentellen Untersuchungen für unterschiedliche Anwendungsfälle untersucht und damit die Effektivität des Verfahrens demonstriert und erläutert werden. Zusammengefasst ergeben sich die nachfolgenden Ziele, die im Rahmen dieser Arbeit erreicht werden sollen.

- Erstellung eines Konzepts für ein Abtragverfahren mittels Schlagbeanspruchung
- Gestaltung eines Werkzeugträgers und eines passenden Werkzeugs
- Aufstellung eines Konzepts für die Erfassung des Beanspruchungszustandes im Rohr
- Aufbau eines Versuchsstandes zur Messung des Beanspruchungszustandes
- Modellierung des Beanspruchungszustandes in Abhängigkeit der Einflussfaktoren
- Aufbau eines Versuchsstandes und experimentelle Untersuchung des Abtragverhaltens

Im nächsten Kapitel wird ein Konzept einer Ausführungsform des Abtragverfahrens mittels Schlagbeanspruchung vorgestellt und mithilfe des C&CM-Ansatzes (Contact-and-Chanel Modell) beschrieben. Ziel ist hierbei die Ermittlung der wichtigen Einflussfaktoren des Verfahrens. Ausgehend von dieser allgemeineren Beschreibung des Verfahrens soll danach die Gestaltung des Werkzeugträgers und eines geeigneten Werkzeugs in Form eines Prototyps erfolgen. Dieser wird dann in einem Versuchsstand zur Erfassung des Beanspruchungszustandes näher untersucht. Die Beanspruchung des Rohrs wird anschließend durch ein mathematisches Modell erfasst. Die Untersuchung des Abtragverhaltens erfolgt dann in einem weiteren Versuchsstand, der die Gegebenheiten im realitätsnahen Maßstab abbildet. Darin werden aus Gründen der Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse und zur Ermittlung der Wirkungen der Einflussfaktoren die Abtraguntersuchungen unter jeweils definierten Randbedingungen durchgeführt. Dies wird dadurch erreicht, dass einige Eigenschaften der Rohrablagerungen im realen Maßstab nachgebildet werden. Mithilfe des Beanspruchungsmodells wird dann das Abtragverhalten erklärt und die Effektivität des Verfahrens demonstriert.

4 Konzept für ein Abtragverfahren mittels Schlagbeanspruchung

In diesem Kapitel wird eine Ausführungsform des Wirkmechanismus Abtragen durch schlagende Beanspruchung mittels des Contact-and-Channel-Connector-Ansatzes (C&C²-Ansatzes¹¹) beschrieben und die verfahrensbestimmenden Einflussfaktoren ermittelt. Das dabei entstehende C&C²-Modell ist nach dem Top-Down¹²-Prinzip aufgebaut, das von einem Gesamtsystem ausgeht und dieses in verschiedene Teilsysteme aufteilt. Im ersten Schritt erfolgt hierzu eine skizzierte Darstellung einer möglichen Ausführungsform des Verfahrens mit den jeweiligen Teilsystemen. Anschließend werden die jeweiligen verfahrensbestimmenden Funktionen und die Einflussfaktoren ermittelt. Diese werden dann im weiteren Verlauf der Arbeit untersucht. Die Beschreibung des Verfahrens erfolgt mit den typischen Begrifflichkeiten des C&C²-Ansatzes. Nachfolgend wird daher kurz auf die Begrifflichkeiten der Methode eingegangen.

4.1 Verfahrensbeschreibung mittels des C&C²-Ansatzes

Die Modellbildung nach dem C&C²-Ansatz wurde am Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entwickelt. Es handelt sich dabei um eine Methode, die die jeweilige Funktion eines technischen Systems mit dem entsprechenden Ort in der Form der Produktgestalt verbindet und damit eine anschauliche Analyse des technischen Systems ermöglicht. Der C&C²-Ansatz basiert auf drei Grundhypothesen, die von Matthiesen [Mat-02] aufgestellt worden sind. Laut ihm und Alink [Ali-10] kann ein „Effekt (z. B. Reibung, Keileffekt, Kraftübertragung, Informationsübertragung, ...) [...] nur dann stattfinden, wenn eine Wirkfläche¹³ (WF) in Kontakt mit einer weiteren Wirkfläche steht, d. h. ein Wirkflächenpaar (WFP) bildet“. Zudem wird „die Funktion eines technischen Systems durch mindestens zwei WFP und sie verbindende Leitstützstrukturen¹⁴ (LSS) erfüllt“. Außerdem ist „ein technisches System [...]

¹¹C&C²-Ansatz ist ein methodischer Ansatz zur Unterstützung von der Analyse und Synthese von technischen Systemen. Die drei C's stammen aus der Basisdefinition und stehen für Contact (Funktionen werden über Kontakte zwischen Wirkflächenpaaren realisiert), Channel (Wirkflächenpaare sind über Leitstützstrukturen miteinander verbunden) und Connector (verbindet das Teilsystem mit der Umgebung) vgl. [Ali-10], [Tha-13], [Mat-02]

¹²Top Down engl. ‚von oben nach unten‘ ist eine Betrachtungsweise bei der Modellierung, die das Gesamtsystem zunächst grob beschreibt und durch anschließendes Aufteilen in Teilsysteme den Detaillierungsgrad erhöht.

¹³Gemäß Matthiesen [Mat-02] sind „Wirkflächen [...] feste Oberflächen von Körpern [...] die dauernd oder zeitweise im Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und am Energie-, Stoff- und Informationsaustausch des technischen Systems beteiligt sind“.

¹⁴Gemäß Matthiesen [Mat-02] sind „Leitstützstrukturen [...] Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzte Räume, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und dauernd oder zeitweise eine Leitung

beschreibbar durch eine Struktur von WFP und LSS“. Diese Grundhypothesen stellen die Grundlage für die Analyse und die Erstellung eines C&C²-Modells dar. Die Modellbildung nach dem C&C²-Ansatz bietet eine große Flexibilität und ist durch die Möglichkeit der Skalierung des Detaillierungsgrades dynamisch auf die Analyse von technischen Systemen anwendbar. Durch die Benennung der Funktion und der Verknüpfung dieser mit der physischen Gestalt erlaubt die Modellbildung mittels des C&C²-Ansatzes eine zielgerichtete Analyse der Zusammenhänge eines technischen Systems.

In Abbildung 14 wurde eine mögliche Ausführungsform des Schlagverfahrens skizziert. Darin eingezeichnet sind die einzelnen Teilsysteme des Verfahrens. Sie stellen die wichtigen Bereiche dar, in der jeweils ein Austausch von Information, Energie oder Stoff stattfindet. Die einzelnen Teilsysteme des Verfahrens sind das Antriebssystem, der Werkzeugträger, das Bearbeitungswerkzeug, das Rohr, die auf der Rohrinnenfläche befindlichen Ablagerungen und die Einspannvorrichtung zum Fixieren des Rohrs.

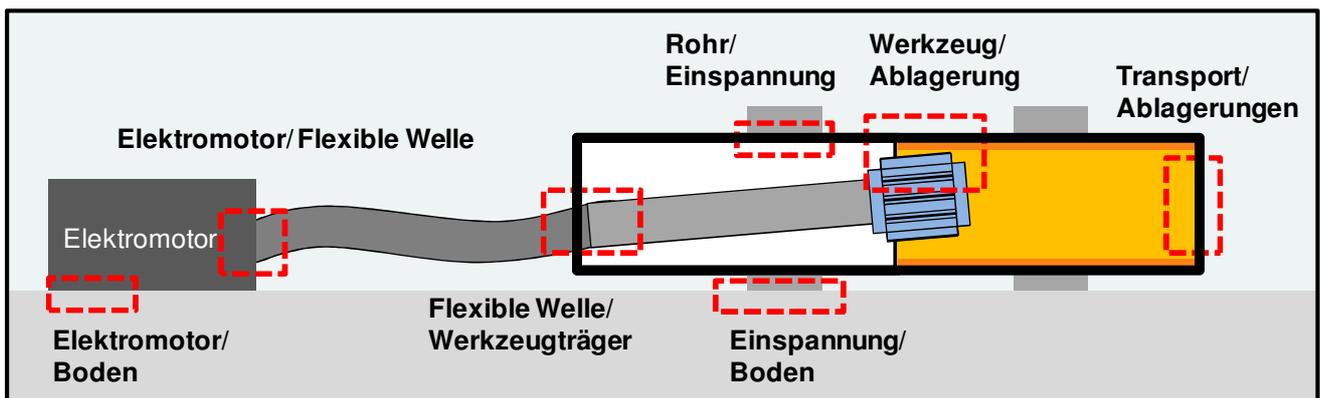


Abbildung 14: Schnittstellen beim Abtrag durch Schlagbeanspruchung

In dieser Ausführungsform stellt der Antrieb die Energie für die Bewegung des Werkzeugträgers in Form von Drehzahl und Drehmoment zur Verfügung. In dem Werkzeugträger wird die Energie in Schwingungen umgesetzt, sodass dieser mitsamt dem Werkzeug aus der Ausgangssituation in der unteren Rohrhälfte beschleunigt wird. Beim Auftreffen der Werkzeugspitze auf die Rohrinnenfläche wird ein Schlagimpuls auf die Auftreffstelle übertragen. Dort kann es zu einer Zertrümmerung und zu einem Herausschlagen der Ablagerungen kommen. Gleichzeitig werden

von Energie, Stoff oder Information zwischen den Wirkflächen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes ermöglichen.

sein und den Schlagimpuls aufnehmen, ohne dass eine Bewegung des Rohrs stattfindet. Diese Funktion wird durch das WFP E in Form einer Einspannvorrichtung realisiert. Nach dem Abtrag (WFP D) müssen die gelösten Ablagerungen aus dem Rohr abtransportiert werden. Dies wird durch die Funktion Nr. 7 und dem WFP F realisiert. Für diese Funktionserfüllung spielen die Korngröße und die Menge der herausgeschlagenen Ablagerungen eine wichtige Rolle. Nach dem Entfernen der Ablagerungen aus einem Abschnitt beginnt der Zyklus erneut, bis keine weiteren Ablagerungen in dem bearbeiteten Rohrquerschnitt mehr vorhanden sind. Durch das WFP A bewegt sich das Werkzeug dabei kontinuierlich zum nächsten Rohrquerschnitt.

Tabelle 6: Wirkflächen und deren Funktionen

Nr.	Funktion	Leitstützstruktur	Wirkflächenpaar
1	Umwandlung von Energie in Schlagenergie	LSS ₁₂	WFB A
2	Übertragung Schlagenergie auf Werkzeugträger	LSS ₂₃	WFP B
3	Befestigung Werkzeug mit Werkzeugträger	LSS ₃₄	WFP C
4	Einbringung Schlagenergie auf Oberfläche	LSS ₃₄	WFP D
5	Aufnahme der wirkenden Kräfte	LSS ₄₅	WFP E
6	Abtrag von Ablagerungen	LSS ₅₆	WFP D
7	Transport der Ablagerungsstücke	LSS _{Unterdruck}	WFP F
8	Vorschub des Werkzeugträgers	LSS _{Welle}	WFP A

Dieses Funktionsmodell stellt die Basis für die nachfolgenden Untersuchungen dar. Je nach Zielsetzung kann das Verfahren auf weiteren Detaillierungsstufen näher beschrieben. Dabei erlaubt das C&C²-Modell aufgrund des fraktalen Charakters die Identifizierung weiterer Wirkflächenpaare und Funktionen. Aufbauend auf dieser Beschreibung der wichtigsten Funktion werden nachfolgend Hypothesen aufgestellt, wie diese Funktionen beeinflusst werden können. Ziel ist hierbei die Ermittlung von Einflussfaktoren, deren Wirkungen dann im weiteren Verlauf der Arbeit qualitativ und auch quantitativ beschrieben und erfasst werden, um zum Verständnis des Gesamtsystems beizutragen.

4.2 Entfernung der Rohrablagerungen durch Schlageinwirkung

Der Ort, an dem die Funktion: „Einbringung Schlagenergie auf Oberfläche“ stattfindet, stellt einen besonders relevanten Ort für die Gesamtfunktion dar. Der Zweck dieser Funktion ist die Einbringung einer Beanspruchung in die Ablagerungen, um die Bruchgrenze zu überwinden und

einen Abtrag zu ermöglichen. Es sind hier viele Einflüsse vorhanden, die eine Rolle für diese Funktionserfüllung spielen. Neben der Geometrie beziehungsweise der Wirkflächen des Werkzeugs spielt der bei der Energieübertragung erforderliche Werkzeugträger eine wichtige Rolle. Dort wird die kinetische Energie des Antriebssystems in Form von Drehzahl und Drehmoment in Schlagenergie umgewandelt. Erst dann kann die Schlagenergie durch das angeflanschte Bearbeitungswerkzeug in die Ablagerungen in Form eines Schlagimpulses eingebracht werden. Die Bewegung des Werkzeugs beziehungsweise des Werkzeugträgers muss dabei im betrachteten Rohrquerschnitt eine gleichförmig verteilte Beanspruchung ermöglichen, damit ein gleichmäßiger beziehungsweise vollständiger Abtrag im Rohrquerschnitt realisiert werden kann. Die Höhe des Schlagimpulses wird beim Aufschlag durch die kinetische Energie des Werkzeugträgers und die geometrische Form des Werkzeugs bestimmt. Um die kinetische Energie des Werkzeugträgers zu berechnen, werden im Folgenden die theoretischen Beziehungen zur Beschreibung der Bewegung des Werkzeugträgers hergeleitet. Auf die Form beziehungsweise die konkrete Gestaltung des Werkzeugträgers wird dann anschließend in Abschnitt 4.3 eingegangen.

4.2.1 Bewegungsgleichung des Werkzeugträgers

Gemäß den Ergebnissen aus Abschnitt 3.3 soll die Entfernung der Ablagerungen im Rohr durch eine schlagende Beanspruchung eines Werkzeugs erfolgen. Nach dem Aufschlag des Werkzeugs auf der Rohrrinnenfläche muss das Werkzeug durch den Werkzeugträger wieder beschleunigt werden, um dann anschließend die kinetische Energie im nächsten Bereich des Rohrquerschnitts auf die Ablagerungen zu übertragen. Ziel ist dabei die Entfernung aller Ablagerungen in dem betrachteten Rohrquerschnitt. Aufgrund des begrenzten Raums in einem Rohrabschnitt ist die mögliche Beschleunigungsstrecke des Werkzeugs begrenzt. Es sind daher hohe Beschleunigungen des Werkzeugträgers notwendig, um eine ausreichend hohe Schlagenergie in die Ablagerungen einzubringen. Die Bewegung des Werkzeugs im Rohr entspricht daher einer hoch dynamischen und periodisch wiederkehrenden Bewegung. Die Realisierung dieser Art von Schwingung kann zum Beispiel durch Vibratoren erfolgen. Nach Kollmann [Kol-02] existieren unterschiedliche Arten von Vibratoren, die auf elektrischen, elektromagnetischen, pneumatischen, hydraulischen oder mechanischen Prinzipien beruhen. Die Vielzahl von mechanischen Schwingantrieben und die konstruktiven Ausführungen der Vibratoren beruhen auf einer exzentrisch bewegenden Unwuchtmasse. Die Drehung der Unwuchtmasse führt aufgrund der radialen Beschleunigung zu einer Schwingung des Gehäuses. Diese Art von Antrieb ist für den Werkzeugträger geeignet, da die Funktion: „Umwandlung von

Energie in Schlagenergie“ und die Funktion: „Einbringung Schlagenergie auf Oberfläche“ getrennt realisiert sind und damit unabhängig voneinander beeinflusst werden können. Die Schnittstelle zwischen den beiden Funktionen stellt das WFP B, WFP C und WFP D dar. Für eine optimale Übertragung der Schlagenergie müssen diese Wirkflächenpaare so gestaltet werden, dass eine möglichst verlustfreie Energieübertragung gewährleistet werden kann.

Zur Beschreibung der dynamischen Bewegung eines schwingenden Werkzeugträgers wird nachfolgend anhand eines Feder-Dämpfer-Modells die Bewegungsgleichung hergeleitet. Damit kann aufgezeigt werden, wie das dynamische Verhalten des Werkzeugträgers beeinflussbar ist. Des Weiteren soll die Grundlage für die Berechnung der Schlagkraft und der Bewegungsgrößen des Werkzeugträgers ermöglicht werden. In Anlehnung an die Modellbildung von Rotoren mit Unwucht nach Dresig [Dre-05] wurde ein allgemeines Berechnungsmodell für einen Werkzeugträger hergeleitet. Dieses besitzt insgesamt sechs verschiedene Parameter und berücksichtigt die wesentlichen Einflussgrößen eines Werkzeugträgers zur Erzeugung von Schwingungen. Das Feder-Dämpfer-Modell ist in Abbildung 16 dargestellt und besteht aus einer rotierenden Unwuchtmasse m_u , die im Abstand der Exzentrizität e mit dem Werkzeugträgergehäuse verbunden ist. Die Masse des Werkzeugträgers wurde vereinfacht als m_g zusammengefasst und beinhaltet zusätzlich alle weiteren Massegrößen, die dem Werkzeugträger zugeordnet werden können. Des Weiteren wurde die Verbindung des Werkzeugträgers mit dem Antriebssystem über eine Steifigkeit k_A und eine Dämpfung d_A im Modell berücksichtigt. Für die Herleitung der Bewegungsgleichung nach dem Prinzip von d'Alembert wurde in Abbildung 16 rechts die Masse m_g freigeschnitten und die wirkenden Kräfte eingezeichnet. Demnach wirken aufgrund der Massen m_g und m_u die Trägheitskraft F_z und die aufgrund der Rotation der Masse m_u die Zentrifugalkraft F_e . Ferner wirken die geschwindigkeitsabhängige Dämpferkraft F_d und die wegabhängige Federkraft F_k der Aufhängung. Auf der Grundlage des Kräftegleichgewichts ergibt sich die in der Formel 4-1 aufgeführte Bewegungsgleichung. Diese beschreibt die Bewegung des Werkzeugträgers in der Richtung der y-Achse:

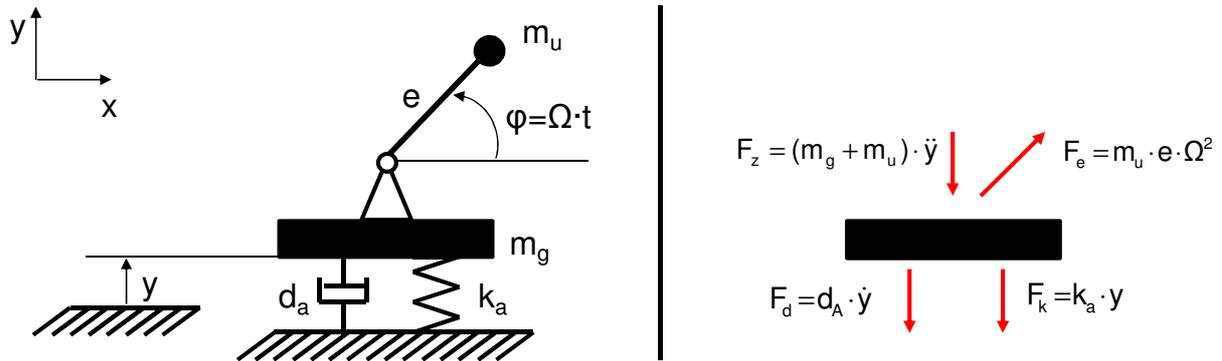


Abbildung 16: Berechnungsmodell für einen Werkzeugträger mit Unwucht (links) und wirkende Kräfte auf das Gehäuse m_G im Freischnitt (rechts)

$$\sum F_y = 0$$

$$F_z + F_d + F_k = F_e \cdot \sin(\Omega t)$$

$$(m_g + m_u) \cdot \ddot{y} + d_a \cdot \dot{y} + k_a \cdot y = m_u \cdot e \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega t)$$

Formel 4-1

mit

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

mit den Parametergrößen:

y	[m]	Auslenkung in y-Richtung
\dot{y}	[m/s]	Geschwindigkeit
\ddot{y}	[m/s ²]	Beschleunigung
m_g	[kg]	Masse des Werkzeugträgergehäuses
m_u	[kg]	Masse der Unwucht
e	[m]	Exzentrizität der Unwucht
k_a	[N/m]	Federkonstante der Aufhängung
d_a	[N s/m]	Dämpfungskonstante der Aufhängung
Ω	[s ⁻¹]	Erregerkreisfrequenz
φ	[°]	Drehwinkel
t	[s]	Zeit

Die Gleichung in der Formel 4-1 beschreibt eine kreisförmige Bewegung des Werkzeugträgers. Dieser ist für eine Anwendung in einem runden Rohrquerschnitt aufgrund der kreisförmigen Bewegung besonders gut geeignet, da die Voraussetzungen für eine gleichförmige Bearbeitung des kreisförmigen Rohrquerschnitts gegeben sind. Die Gleichung beschreibt den inneren Wirkbereich des Werkzeugträgers in Form der maximalen Auslenkung. Anhand der Gleichungsparameter kann für einen gegebenen Rohrquerschnitt der Wirkbereich optimiert werden. Hierbei sollte berücksichtigt werden, dass zwar der Wirkbereich des Werkzeugträgers im Wesentlichen durch die genannten geometrischen Größen festgelegt wird, aber weitere

Parameter wie zum Beispiel die Elastizität der Aufhängung den Wirkbereich zudem wesentlich beeinflussen können.

Die Schlagenergie des Werkzeugträgers wird über die Funktion: „Einbringung Schlagenergie auf Oberfläche“ auf die Ablagerungen übertragen. Der dabei sich einstellende Abtrag wird durch die Geometrie des Bearbeitungswerkzeugs festgelegt. Nachfolgend wird daher die Werkzeugform näher betrachtet.

4.2.2 Werkzeugformen für die Erzeugung von Schlagbeanspruchungen

Die Hauptaufgabe des Werkzeugs ist die zielgerichtete Übertragung der kinetischen Energie des Werkzeugträgers auf die Ablagerungen, sodass ein Abtrag realisiert werden kann. Dabei sind die Höhe der Schlagenergie sowie die Geometrie des Werkzeugs die wichtigen Einflussgrößen. Die Höhe der Schlagenergie wird durch den Werkzeugträger bestimmt. Über eine Befestigung des Werkzeugs mit dem Werkzeugträger (WFP C) wird die kinetische Energie des Werkzeugträgers auf das Werkzeug übertragen. Damit die maximale Energie beim Schlagvorgang bereitstehen kann, sollte diese annähernd verlustfrei übertragen werden. Bei mechanischen Vorgängen treten Verluste aufgrund von Reibung und Verformung auf. Eine Relativbewegung zwischen dem Werkzeugträger und dem Bearbeitungswerkzeug sollte durch die konstruktive Gestaltung der Befestigung vermieden werden. Die Einbringung der Schlagkraft in die Ablagerungen wird durch die Funktion „Einbringung Schlagenergie auf Oberfläche“ (WFP D) über den Kontakt des Werkzeugs mit den Ablagerungen in der Rohrrinnenwand beeinflusst. Dabei muss die beim Kontakt zwischen dem Werkzeug und den Ablagerungen entstehende Belastung die Beanspruchungsgrenze der Ablagerungen überwinden, um durch das Eindringen der Werkzeugspitze in die Ablagerungen einen zumindest lokalen Riss beziehungsweise einen Bruch zu erzeugen und die Funktion „Abtrag der Ablagerungen“ zu realisieren. Eine wesentliche Rolle beim auftretenden Beanspruchungszustand spielt die Gestaltung der Werkzeuggeometrie.

Es existiert eine große Vielfalt an möglichen Formen für das Schlagwerkzeug. Die unterschiedlichen Formen können nach der Kontaktart mit dem zu bearbeitenden Material unterschieden werden. Bei der Betrachtung der Aufschlagzone sind drei idealisierte Formen des Werkzeugkontaktes mit den Ablagerungen in der Rohrrinnenwand vorstellbar. Je nach Werkzeuggeometrie kann der anfängliche Kontakt punkt- oder linienförmig erfolgen. Des Weiteren ist auch ein flächiges Berühren der Wirkflächen möglich. Zum Beispiel wird beim Fräsen von spröden Werkstoffen mittels Schlaglamellen ein Abtrag punktförmig durch die Hartmetallspitze des Werkzeugs herbeigeführt, wohingegen beim Bearbeiten von harten

Gesteinen mit einem Hammer und mit Meißelwerkzeugen auch ein linienförmiger Kontakt vorliegen kann. Ein Auszug über mögliche Schlagwerkzeuge wurde bereits in Abschnitt 2.3.3 gegeben. Der Unterschied in den Kontaktarten liegt auch darin, wie groß der Bedarf an Energie ist, um die Beanspruchungsgrenze des Materials zu überschreiten. Der punktförmige Werkzeugkontakt erzeugt in der Aufschlagzone bei gleicher Schlagenergie eine höhere Beanspruchung als ein linienförmiger oder flächiger Kontakt. Je nach Art des zu bearbeitenden Materials ist daher eine passende Werkzeuggeometrie auszuwählen. Bei den Ablagerungen handelt es sich gemäß Abschnitt 2.1 um eine relativ dünne Beschichtung, mit einer Dicke von wenigen Millimetern, sodass keine große Eindringtiefe des Werkzeugs nach dem Auftreffen auf die Oberfläche zu erwarten ist. Die wirkenden Kräfte sollen im Idealfall so groß sein, dass die Beschichtung komplett durchdrungen werden kann. Eine vergleichsweise hohe Eindringkraft, wie sie durch ein punktförmiges Werkzeug gegeben ist, ist daher nicht erforderlich. Im Falle eines Durchdringens der Ablagerungen kann die restliche Schlagenergie den Verschleiß der Werkzeugspitze durch den Kontakt mit metallischem Trägerwerkstoff des Rohrs vergrößern. Zudem ist eine große Einwirkzone, wie sie bei einer linienförmigen Werkzeuggeometrie vorliegt, beim Abtragprozess vorteilhaft, da die Beanspruchung auf einen großen Bereich verteilt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher Untersuchungen mit einer Werkzeuggeometrie durchgeführt, die einen linienförmigen Kontakt mit der Ablagerung ermöglicht. Die Gestaltung eines Werkzeugs mit vorwiegend linienförmiger Kontaktzone kann mit einer keilförmigen Werkzeuggeometrie realisiert werden. Bei der Gestaltung dieser Art der Werkzeugkante ergeben sich verschiedene Variationsgrößen, die in der nachfolgenden Tabelle 7 zusammengefasst sind.

Bei einem keilförmigen Abtragwerkzeug dringt die Kante des Keils in das Material ein. Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben wurde, ist dabei der Keilwinkel α_k für das Verhältnis der Aufteilung der Schlagkraft in eine normal und in eine senkrecht zu den Seitenflächen wirkende Kraftkomponente verantwortlich. Die Keilanzahl K_a beschreibt die Schlagverteilung im Rohrquerschnitt. Damit hat der Keilwinkel einen direkten Einfluss auf die Höhe der Beanspruchung und damit auch auf den Verschleiß der Werkzeugkante. Die Keilhöhe h_k bestimmt die mögliche Eindringtiefe des Keils. Die Anordnung der einzelnen Keile kann bei einem Werkzeug längs, schräg oder radial erfolgen. In Abhängigkeit der Keilanordnung kann die Richtung des Abtrags beeinflusst werden. Bei einem radial zum Rohr angeordneten Keil erfolgt der Abtrag quer zur Längsrichtung des Rohrs, während bei längs ausgerichteten Kanten der Abtrag in Längsrichtung des Rohrs erfolgt. Die eingebrachte Höhe der Beanspruchung und die Kontaktzone eines Keils mit den Ablagerungen beim Schlag werden durch die Keillänge bestimmt.

Tabelle 7: Parameter eines Keils als Werkzeuggeometrie anhand einer schematischen Darstellung

Keilwinkel	α_k
Keilneigung	β
Keilanordnung zur Rohrachse	längs, quer, schräg
Keilanzahl	K_a
Keilhöhe	h_k
Keillänge	l
Abstand zum Rohr	d_A

Der idealisierte Zustand des Aufschlags einer keilförmigen Werkzeuggeometrie ist der vollständige Kontakt der Keilkante mit der Oberfläche der Ablagerungen. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen und der Bewegungsform des Werkzeugträgers tritt dieser idealisierte Zustand nie ein. Stattdessen ist beim Einschlag zunächst nur ein Teil der Kante mit der Ablagerungsoberfläche in Berührung und vergrößert beim Eindringen in das Material die Kontaktzone. Daher ist beim Schlag eines keilförmigen Werkzeugs zu Beginn stets von einem punktförmigen Erstkontakt auszugehen, der im Laufe der Schlagzeit und im Falle des Eindringens in einen linienförmigen Kontakt übergeht. In der nachfolgenden Abbildung 17 ist der Eindringvorgang in einzelnen Sequenzen dargestellt.

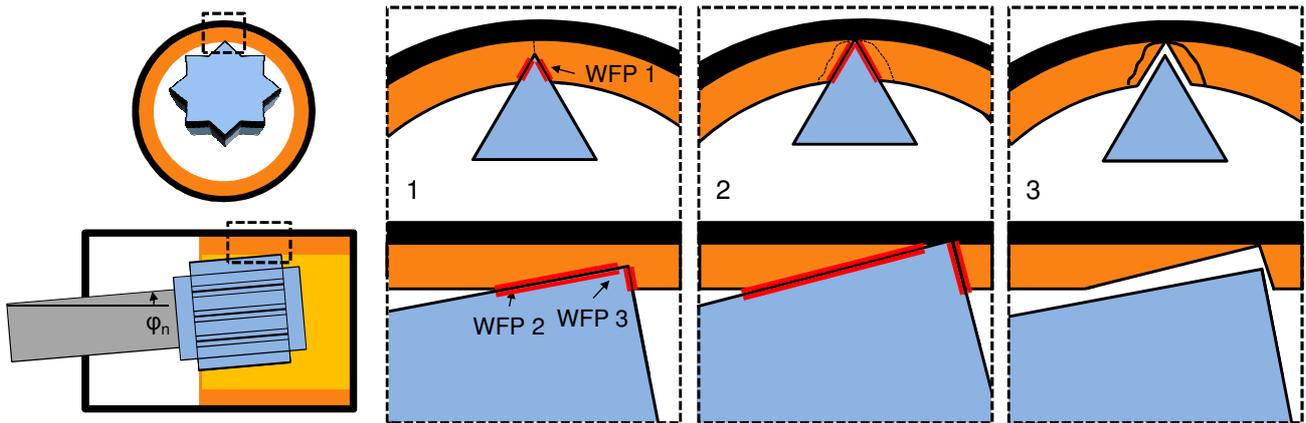


Abbildung 17: Schematische Abtragsequenz:: Ansicht von vorne und von der Seite

Beim Eindringen des Werkzeugs kommen zunehmend die Seitenflächen des Keils (WFP 1) in Kontakt mit den Ablagerungen. Das Werkzeug wird dadurch abgebremst. Zusätzlich werden in den Ablagerungen über die Seitenfläche des Keils, Querkräfte eingebracht. Im Falle eines ideal spröden Werkstoffs führen die Seitenkräfte zu einer Vergrößerung des in der Eindringrichtung geöffneten Risses und zur Schädigung des Werkstoffzusammenhaltes. Die maximale Kontaktzone ist dabei erreicht, wenn die Werkzeugkante die Ablagerungen komplett durchdrungen hat und auf die Rohinnenfläche aufschlägt. Nach dem Aufschlag wird der Werkzeugträger neben der Werkzeugträgerbeschleunigung durch den Rückprall aus der Kontaktzone heraus beschleunigt, bis der nächste Einschlag auftritt. Die letzte Grafik in der dargestellten Sequenz der Abbildung 17 zeigt vereinfacht das Abtragbild nach dem Schlag. Es ist zu erkennen, dass an der Kontaktzone kein gleichmäßiger Abtrag aufgrund der Bewegungsform des Werkzeugträgers und des daraus folgenden zunächst punktförmigen Kontakts auftreten kann. Der maximale Abtrag tritt an der Spitze der Werkzeugkante auf und nimmt entlang der Kante ab. Die Höhe des Abtrags hängt daher auch von dem freien Spiel des Werkzeugs im Rohr ab. Bei einem großen Abstand d_A zwischen der Kante und der Oberfläche der Ablagerungen ist der Neigungswinkel φ_n (vgl. Abbildung 17) des Werkzeugs größer und damit dieser Effekt stärker ausgeprägt. Durch eine konstruktive Gestaltung der Keilneigung β kann ein flacher Kontakt mit der Oberfläche eingestellt werden, sodass die Kontaktzone vergrößert werden kann. Neben der Kante ist auch die stirnseitige Flanke des Werkzeugs, dargestellt durch WFP 3, beim Schlag in Kontakt mit den Ablagerungen. Aufgrund der kleineren Wirkfläche spielt dieser beim Abtragprozess selbst eine untergeordnete Rolle. Wird das Werkzeug horizontal bewegt, kann die Flanke einen Widerstand darstellen. Entsprechend bietet sich hier durch konstruktive Anpassung eine Optimierung an die vorherrschenden Randbedingungen an.

Die Geometrie des Werkzeugs ist ein wesentliches Element bei dem Schlagverfahren, da hierdurch die Beanspruchung und damit der Abtrag beeinflusst werden kann. Das Ziel des Abtragwerkzeugs ist die Einbringung einer ausreichend großen und gleichmäßig verteilten Belastung, um einen gleichmäßigen Abtrag im Rohrquerschnitt zu ermöglichen. Mithilfe der aufgeführten Größen kann bei einer Anwendung die Geometrie des Werkzeugs angepasst werden. Basierend auf diesen Parametern wird im folgenden Abschnitt 4.3 die Gestaltung der Werkzeuggeometrie für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit festgelegt.

4.3 Gestaltung von Werkzeugträger und Werkzeug

In diesem Abschnitt wird die bisher theoretisch behandelte Ausführungsform des Schlagverfahrens in eine physische Struktur in Form eines Prototyps überführt. Hierfür wurden für den Werkzeugträger unterschiedliche am Markt vorhandene Geräte untersucht. Die Randbedingungen waren die Erzeugung von Schwingungen unter beengten Bauraumverhältnissen eines Rohrs. Als ein geeignetes Basisgerät wurde ein sogenannter Innenvibrator aus der Bauindustrie ausgewählt und entsprechend für den Einsatz als Werkzeugträger modifiziert. Da es auf dem Markt keine vergleichbare Anwendung gab, wurde das Abtragwerkzeug auf der Grundlage des vorherigen Abschnittes neu konstruiert. Im nachfolgenden Abschnitt werden der Aufbau sowie die Eigenschaften des Werkzeugträgers und des Werkzeugs vorgestellt.

4.3.1 Werkzeugträger und Bewegungsverhalten

Als Werkzeugträger wurde ein Innenvibrator des Typs H35 der Serie HMS der Firma Wacker Neuson ausgewählt. Innenvibratoren werden im Baugewerbe üblicherweise eingesetzt, um Frischbeton zu verdichten. Durch die Schwingungen des Innenvibrators wird der Beton lokal in Schwingungen versetzt, sodass eine Verdichtung des Betons stattfinden kann. Die Dimensionierung und Auslegung des Innenvibrators ist daher für den Einsatz von Beton konzipiert und erfordert einige Veränderungen, um als Werkzeugträger für ein Abtragverfahren eingesetzt zu werden. Aufgrund der länglichen und kompakten Form eignet sich der Innenvibrator für den Einsatz unter beengten Bauraumbedingungen eines Rohrs. Der elektrische Antrieb befindet sich beim System HMS, abgebildet in Abbildung 18, außerhalb des Innenvibrators. Im Gehäuse des Innenvibrators befindet sich die Unwuchtwellen zur Erzeugung der Schwingungen. Durch den einfachen mechanischen Aufbau ist der Innenvibrator robust und für den Einsatz als Werkzeugträger unter schlagender Beanspruchung im Rohr prinzipiell geeignet. Zur Anpassung des Innenvibrators an die Anforderungen als Werkzeugträger wurden an einigen Stellen konstruktive Veränderungen vorgenommen. Diese beinhalten zum einen die

Möglichkeit zur Befestigung eines Werkzeugs (WFP C) und zum anderen die Erhöhung des Bewegungsfreiheitsgrades durch den Einbau eines Gelenkes im WFP A.

Zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens wurde der Werkzeugträger vermessen und daraus ein CAD-Modell aufgebaut. In Abbildung 18 rechts ist eine Explosionszeichnung des Werkzeugträgers dargestellt. Die wesentlichen Elemente des Werkzeugträgers sind das Gehäuse, die gelagerte Unwuchtwelle und das Gelenk. Die Unwuchtwelle wird über eine Nabe mit der Wellenseele¹⁵ verbunden und durch einen Elektromotor angetrieben. Die Wellenseele kann dabei unterschiedlich lang ausgeführt sein, sodass der Elektromotor außerhalb des Rohrs positioniert werden kann und damit den Abtragprozess nicht behindert. Die Wellenseele bildet mit dem elastischen Gehäuse eine flexible Welle. Dabei dient das elastische Gehäuse als Lagerung für die Wellenseele. Der Elektromotor bewegt die Wellenseele, die dann die Rotation der Unwuchtmasse des Werkzeugträgers bewegt und dadurch den Werkzeugträger in Schwingungen versetzt.

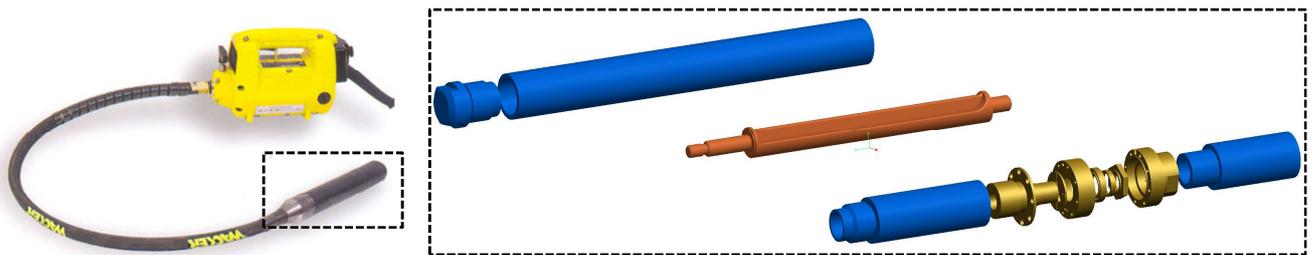


Abbildung 18: HMS-System des Herstellers Wacker Neuson und CAD-Modell des Werkzeugträgers bestehend aus Gehäuse (blau), Unwucht (orange) und Gelenk (gelb)

Die Beschreibung der Bewegung des Werkzeugträgers kann durch die aufgestellte Bewegungsgleichung aus Abschnitt 4.2.1 erfolgen. Hierzu wurde die Formel 4-1 nach der Beschleunigung \ddot{y} aufgelöst:

$$\ddot{y} = \frac{(m_u \cdot e \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega t) - d_a \cdot \dot{y} - k_a \cdot y)}{(m_g + m_u)} \quad \text{Formel 4-2}$$

Die Gleichung berücksichtigt durch den Dämpfungsfaktor d_a sowie durch die Federsteifigkeit k_a , den Einfluss der Aufhängung des Werkzeugträgers, der durch die flexible Welle gegeben ist. Im vorliegenden Fall können diese Terme vernachlässigt werden. Zum einen handelt es sich bei der

¹⁵Die Wellenseele ist eine elastische Welle aus Federstahl, die für die Moment- und Drehzahlübertragung eingesetzt wird. Diese ist in einem elastischen Gehäuse gelagert und bildet die flexible Welle, die den Elektromotor und den Werkzeugträger miteinander verbindet.

Aufhängung um eine flexible Welle bestehend aus einem gummi-/ metallummantelten Gehäuse und zum anderen aus der Wellenseele, die aus gewundenem Stahl gefertigt ist. Aufgrund der guten elastischen Eigenschaft der Welle wird die Dämpfung daher vernachlässigt. Zudem ist durch den Einsatz im Rohr der mögliche Bewegungsspielraum des Werkzeugträgers durch die Rohrwand von vornherein auf wenige Millimeter eingeschränkt. Trotz der dynamischen Bewegung des Werkzeugträgers ist die absolute Bewegung des Werkzeugträgers damit minimal und durch den Abstand des Werkzeugs zur Rohrwand vorgegeben. Es wird daher der bewegungsabhängige Term der Federsteifigkeit und der Dämpfung in der Bewegungsgleichung vernachlässigt. Durch diese Annahmen wird die Bewegungsgleichung wesentlich vereinfacht und lässt sich wie folgt zusammenfassen:

$$\ddot{y} = k \cdot m \cdot e \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega t) \quad \text{mit } m = \frac{(m_u)}{(m_g + m_u)} \quad \text{Formel 4-3}$$

mit den Parametergrößen:

\ddot{y}	[m/s ²]	Beschleunigung in y-Richtung
m_g	[kg]	Masse des Gehäuses
m_u	[kg]	Masse der Unwucht
e	[m]	Exzentrizität der Unwucht
k	[-]	Korrekturfaktor
Ω	[s ⁻¹]	Erregerkreisfrequenz
t	[s]	Zeit

Mithilfe dieser Formel können viele Einflussmöglichkeiten auf das Bewegungsverhalten des Werkzeugträgers erkannt werden. Die Beschleunigung des Werkzeugträgers ist demnach von dem Masseverhältnis des Gehäuses und der Unwucht sowie von der Exzentrizität und der Winkelgeschwindigkeit der Unwucht abhängig. Zur Überprüfung der Bewegungsgleichung aus der Formel 4-3 wurden Messungen zur Ermittlung der auftretenden Beschleunigungen am Werkzeugträger durchgeführt und den Werten aus der Bewegungsgleichung gegenübergestellt. Hierzu wurden am Werkzeugträgergehäuse die Schwingungen mittels eines einaxialen Beschleunigungssensors vom Typ AV3200M39 des Anbieters Althen gemessen und mittels einer Fast Fourier Transformation (FFT) die Frequenz sowie die Amplitude der Schwingungen ermittelt. Zur Untersuchung unterschiedlicher Frequenzen wurde der Elektromotor des Werkzeugträgers über eine Phasenanschnittsteuerung mit unterschiedlicher Drehzahl angetrieben. Bei der Messung der Beschleunigung wurde die flexible Welle 100 mm vom Werkzeugträgergehäuse durch eine Rohrschelle fest eingespannt und die Messung entlang des Werkzeugträgers an verschiedenen Stellen durchgeführt (vgl. Abbildung 19 links). Die Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 19 rechts, zeigen, dass die maximale Beschleunigung am

freien Ende des Werkzeugträgers auftritt, da dort die Bewegung nicht eingeschränkt ist. In Richtung der Einspannstelle, zur flexiblen Welle hin, nimmt die Wirkung der rotierenden Unwucht linear zur Einspannstelle ab und kann dort vernachlässigt werden. Der Effekt ist umso größer, je steifer die Einspannstelle ausgeführt ist.

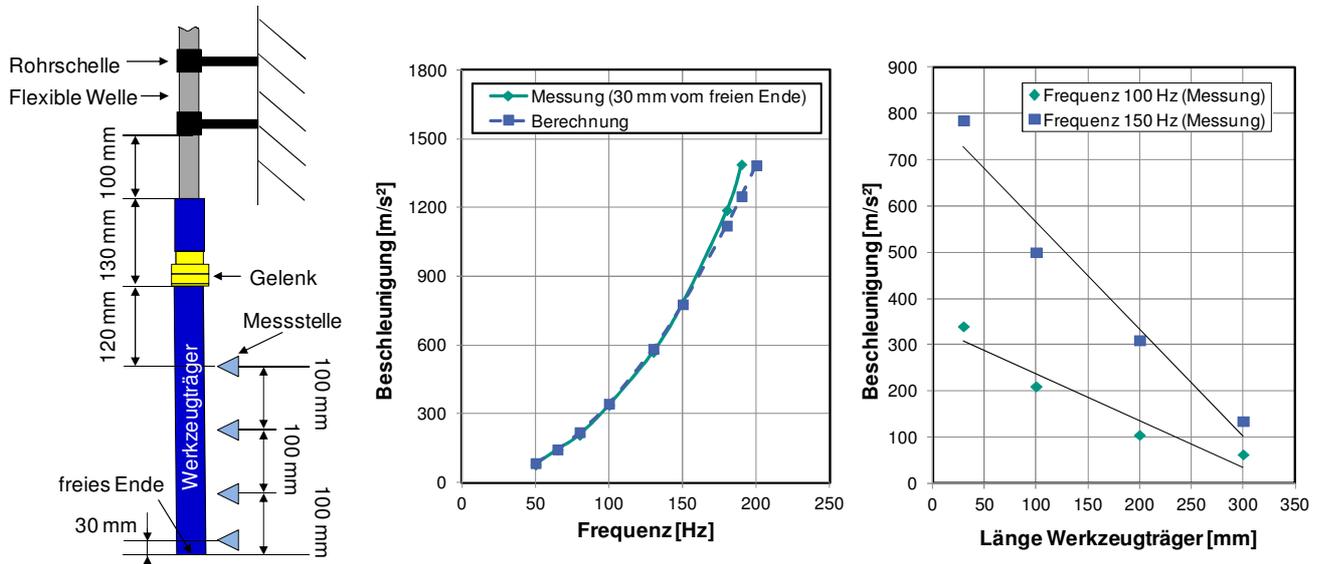


Abbildung 19: Versuchseinrichtung (links), Einfluss der Frequenz über die Beschleunigung (Mitte) und Verlauf der Beschleunigung über die Werkzeugträgerlänge (rechts)

Wie bereits aus der Formel 4-3 ersichtlich ist, liegt eine quadratische Abhängigkeit der Beschleunigung von der Drehzahl beziehungsweise der Frequenz der Unwucht vor. Um die Messwerte mit der theoretischen Berechnung zu vergleichen, wurden für unterschiedliche Frequenzen die Beschleunigungswerte berechnet. Hierzu wurden die Exzentrizität $e = 3,34$ mm und die Unwucht $m_u = 0,376$ kg auf Basis der CAD-Daten ermittelt. Die Gesamtmasse des Werkzeugträgers beträgt 1,638 kg. Mit diesen Werten wurden die Beschleunigungen, anhand der Bewegungsgleichung in der Formel 4-3, für unterschiedliche Frequenzen berechnet. Der Vergleich der Messwerte und der Berechnungswerte ist in der nachfolgenden Tabelle 8 für unterschiedliche Frequenzen angegeben. Das Verhältnis zwischen der Messung und der Berechnung wird nachfolgend als Korrekturfaktor bezeichnet und beträgt im Mittel $k_f = 1,14$.

Tabelle 8: Messung und Berechnung der Beschleunigung für unterschiedliche Frequenzen

Frequenz [Hz]	50	65	80	100	130	150	180	190
Messung [m/s ²]	80	145	210	340	572	785	1190	1390
Berechnung [m/s ²]	76	128	194	303	512	681	981	1093
Korrekturfaktor k_f [-]	1,06	1,13	1,08	1,12	1,12	1,15	1,21	1,27

Wird der Korrekturfaktor k_f mit den berechneten Werten multipliziert, so zeigt sich in Abbildung 19 Mitte, dass die berechneten Werte mit den Werten der Messung eine gute Übereinstimmung aufweisen. Damit kann die Gleichung aus der Formel 4-3 zur Beschreibung der Beschleunigung herangezogen werden. Der Korrekturfaktor ist notwendig, da die Beschleunigung am Gehäuse des Werkzeugträgers an der Spitze gemessen wurde, während die analytische Berechnung anhand der Formel 4-3 die Beschleunigung in der Mitte des Werkzeugträgers wiedergibt.

Die auf die Ablagerungen übertragene Schlagkraft ist abhängig von der kinetischen Energie des Werkzeugträgers. Die Ermittlung der kinetischen Energie in Form der Geschwindigkeit kann durch einfache Integration der Formel 4-3 berechnet werden. Dabei ergibt sich eine lineare Funktion zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverlaufs in Abhängigkeit der Frequenz beziehungsweise Drehzahl. Je größer die kinetische Energie und damit die Geschwindigkeit des Werkzeugträgers ist, umso größer ist die Schlagkraft, die auf die Ablagerungen beim Schlag übertragen werden. Durch zweifache Integration der Formel 4-3 wird der zurückgelegte Weg des Werkzeugträgers berechnet. Die maximale Auslenkung des Werkzeugträgers entspricht dem Wirkungsbereich des Werkzeugträgers. Anders als zuvor ist der Wirkungsbereich unabhängig von der Drehzahl und nur von den geometrischen Randbedingungen des Werkzeugträgers abhängig. Der Werkzeugträger besitzt stets die gleiche maximale Auslenkung bei unterschiedlichen Drehzahlen. Aufgrund der elastischen Welle kann der Werkzeugträger jedoch auch stärker ausgelenkt werden. Dies kann vor allem durch den beim Aufschlag entstehenden Rückprallimpuls erfolgen. Dabei bewegt sich das Werkzeug zunächst in Richtung des Rückpralls, wobei es gleichzeitig durch die Drehung der Unwucht beziehungsweise der Fliehkraft eine weitere Beschleunigung erfährt. Die Überlagerung der beiden Beschleunigungskomponenten definiert den Ort des nächsten Aufschlags in der Rohrwand. Beim nächsten Schlag des Werkzeugs auf die Rohrwand kann der Anteil der Rückprallenergie auf die Schlagenergie vernachlässigt werden, weil dieser zum einen vom Betrag her deutlich kleiner ist und zum anderen durch die Bewegung des Werkzeugträgers und der flexiblen Welle in Verlustenergie umgewandelt wird. Der Rückprall erhöht daher nur den Wirkungsbereich des Werkzeugträgers, ohne dass er einen Einfluss auf die Schlagenergie besitzt. Trotz eines kleinen inneren Wirkungsbereichs kann das Werkzeug damit außerhalb dieses Bereichs bewegt werden, solange der notwendige Rückprall ausreichend groß ist. Die eigentliche Bewegung des Werkzeugträgers ist zum einen die kreisförmige Bewegung, die durch die Bewegungsgleichung festgelegt ist und zum anderen eine taumelnde Bewegung, die aufgrund der Dynamik im Rohr hervorgerufen wird.

Zur Beeinflussung des inneren Wirkbereichs des Werkzeugträgers bietet die geometrische Gestaltung der Unwucht als zentrales Element verschiedene Möglichkeiten. Der Einfluss der Unwucht wird durch die Parameter Durchmesser, Länge und Dichte des Werkstoffs sowie der Exzentrizität festgelegt. Bei der Veränderung der einzelnen Parametergrößen liegt jeweils ein linearer Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Werkzeugträgers vor. Die Länge und der Durchmesser des Werkzeugträgers haben nur einen Einfluss auf die Masse m_u der Unwucht. Beim Durchmesser hingegen liegt eine Wechselwirkung zwischen der Masse m_u und der Exzentrizität e vor. Neben der Unwucht besitzt gemäß der Formel 4-3 auch die Gehäusemasse m_g einen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Werkzeugträgers. Um für einen Anwendungsfall die Bewegung des Werkzeugträgers anzupassen, ist ein Zusammenspiel dieser Parametergrößen erforderlich. Neben diesen Geometriegrößen bietet die Materialauswahl des Gehäuses und der Unwucht zusätzliche Einflussmöglichkeiten. Durch die Auswahl einer leichten Aluminiumlegierung kann beispielsweise das Gewicht des Gehäuses im Vergleich zu einem Gehäuse aus Stahl deutlich reduziert und dadurch höhere Beschleunigungen bei gleicher Drehzahl erzielt werden.

Durch den quadratischen Einfluss der Drehzahl auf die Beschleunigung und einen linearen Einfluss auf die Geschwindigkeit stellt die Drehzahl einen wichtigen Einflussfaktor dar. Anders als die geometrischen Einflussfaktoren kann die Drehzahl auch während des Prozesses verändert werden. Zwar kann dadurch die Schlagenergie einfach beeinflusst werden, jedoch treten auch Nachteile bei der Veränderung der Drehzahl auf. Die Erhöhung der Drehzahl verringert die nominelle Lebensdauer¹⁶ der Lager und erhöht den Verschleiß sowie die Wärmeentwicklung durch die Reibungen in den Lagern. Ohne ein passendes Kühlkonzept können der Werkzeugträger und insbesondere die mit dem Werkzeugträger verbundene flexible Welle Schaden nehmen. Daher sollten die Optimierungsmöglichkeiten des Werkzeugträgers durch die geometrischen Parameter ausgeschöpft werden. Es ist dennoch wichtig, dass der Werkzeugträger von vornherein auf den jeweiligen Anwendungsfall durch die geometrischen Parameter dimensioniert wird. Ein geometrisch optimierter Werkzeugträger kann bereits bei kleinen Drehzahlen relativ hohe Beschleunigungen liefern. Die dadurch reduzierte Wärmeentwicklung kann zusätzlich durch eine verbesserte Wärmeabgabe an die Umgebung weiter verbessert werden und damit einen wichtigen Beitrag zum Kühlkonzept leisten.

¹⁶Bei der Dimensionierung von Lagern gibt die nominelle Lebensdauer die Anzahl an Umdrehungen an, die ein Großteil der Lager erreicht oder überschreitet, bevor die ersten Anzeichen einer Werkstoffermüdung auftreten.

4.3.1.1 Bewegungsformen des Werkzeugträgers

Die beiden wichtigsten Funktionen des Werkzeugträgers sind zum einen die Bewegung des Werkzeugs zur Ablagerungsoberfläche und zum anderen die Erzeugung einer ausreichend großen Schlagenergie für den Abtrag. Die Bewegung des Werkzeugträgers wird durch die Zentrifugalkraft der drehenden Unwuchtwelle bestimmt. Es handelt sich dabei um eine kreisförmige Bewegung, die durch Projektion auf einer Achse der Betrachtungsebene durch eine sinusförmige Bewegung beschrieben werden kann. Während die Unwuchtwelle rotiert, liegt am Außenring der Lager eine Umfangslast vor, die zu einem Drehmoment an dem Werkzeugträgergehäuse führt. Da die Befestigung des Werkzeugträgergehäuses mit der flexiblen Welle über eine Verschraubung verbunden ist, kann infolge des Drehmoments die Schraubverbindung geöffnet werden. Aus diesem Grund wird bei Innenvibratoren die Befestigung mit der flexiblen Welle über ein Linksgewinde realisiert. Dadurch ist die Rotation des Werkzeugträgers nicht mehr möglich und ein Selbstlösen während des Betriebs wird verhindert. Die Einschränkung dieser Bewegungsfreiheit wirkt sich bei der Anwendung als Schlagverfahren nachteilig aus, da dadurch die Kontaktwahrscheinlichkeit des Werkzeugträgers mit den Ablagerungen in der Rohrwand reduziert wird. Um den Bewegungsspielraum des Innenvibrators als Werkzeugträger zu erhöhen und ein Selbstlösen dennoch zu verhindern, wurde zwischen dem Werkzeugträger und der flexiblen Welle (WFP A) ein Gelenk eingebaut, das in Abbildung 18 rechts abgebildet ist. Das Drehmoment infolge der Lagerreibung führt nun zu einer Beschleunigung beziehungsweise Rotation des Gehäuses und erhöht damit die Wahrscheinlichkeit eines Kontaktes zwischen den Werkzeugkeilen und den Ablagerungen in der Rohrwand. Die Drehrichtung entspricht dabei der Drehrichtung der Unwuchtwelle. Abbildung 20 zeigt schematisch die Drehbewegung des Werkzeugträgers, wenn das Gehäuse über ein Gelenk mit der flexiblen Welle des Elektromotors verbunden ist. Neben einer kreisförmigen Bewegung des Werkzeugträgers, die den Wirkungsbereich festlegt, kommt es zu einer zweiten Drehbewegung des Werkzeugträgers um die Längsachse herum. Die Drehrichtung beider Bewegungen erfolgt dabei in gleicher Richtung.

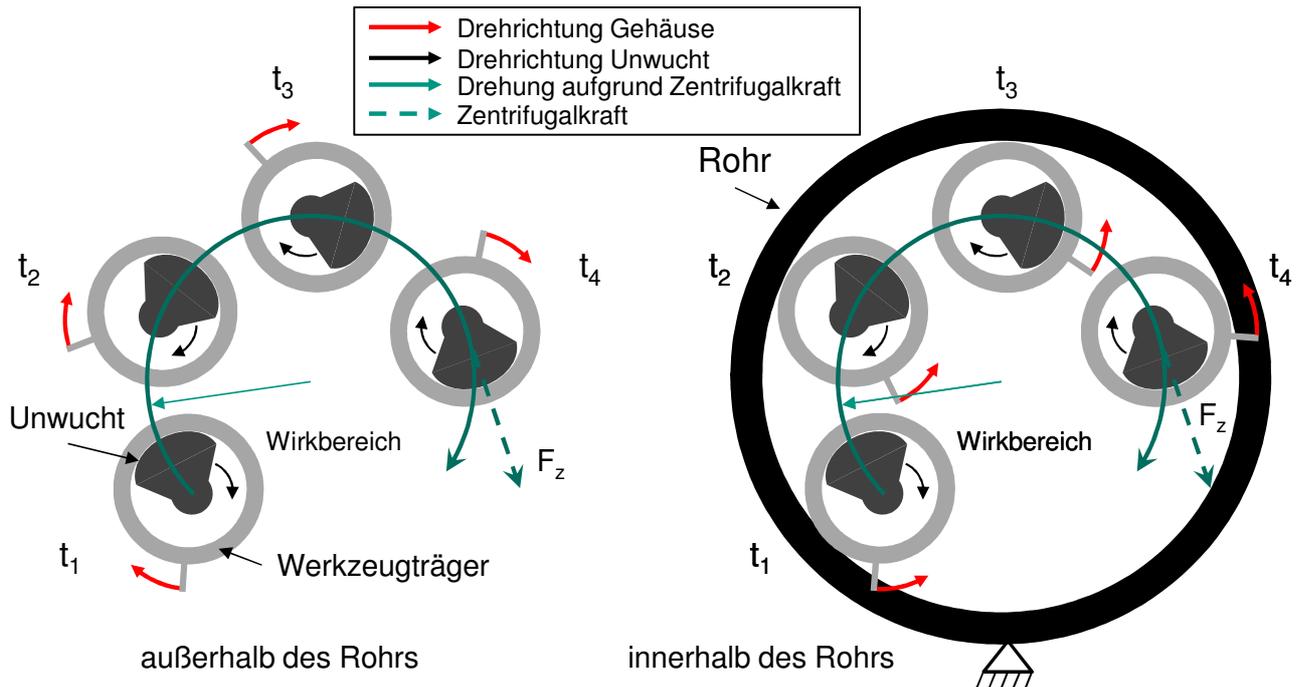


Abbildung 20: Bewegungsformen des Werkzeugträgers zu unterschiedlichen Zeitpunkten außerhalb des Rohrs (links) und innerhalb des Rohrs (rechts)

Befindet sich der Werkzeugträger innerhalb eines Rohrs, wie rechts in Abbildung 20 dargestellt, so kann der Lagereibungseffekt, der die Rotation verursacht, vernachlässigt werden. Hier zeigt sich, anders als erwartet, eine Drehung des Gehäuses entgegengesetzt der Drehrichtung der Unwucht. Die Ursache hierfür liegt in den kreisförmig taumelnden Bewegungen des Werkzeugträgers. Hervorgerufen wird diese taumelnde Bewegung durch die einseitige Befestigung des Werkzeugträgers mit der flexiblen Welle des Elektromotors. Dadurch ist die Bewegung an der befestigten Seite gehemmt, während sich der Werkzeugträger an der freien Seite frei bewegen kann. Dies wurde bereits bei der Messung der Schwingungen entlang des Werkzeugträgers deutlich, was in den Messergebnissen in Abbildung 19 rechts zu erkennen ist. Die taumelnde Bewegung des Werkzeugträgers wird durch den Kontakt mit der Rohrinnenfläche abgebremst, sodass es zu einer abrollenden Bewegung des Werkzeugträgers kommt. Wie in Abbildung 20 rechts dargestellt, führt dies dann zu einer Drehbewegung, die der Bewegungsrichtung der Unwucht entgegengesetzt ist. Die zusätzliche Drehbewegung des Werkzeugträgergehäuses und damit des angeflanschten Werkzeugs im Rohrquerschnitt führt zu einer Verbesserung der Kontakthäufigkeit des Werkzeugträgers. Eine Erhöhung der Schlagenergie durch die Drehbewegung kann aufgrund des kleinen Lagerreibungsdrehmoments vernachlässigt werden, auch deshalb, weil die Bewegungsrichtung hierbei senkrecht zu der Schlagrichtung erfolgt. Die Verbesserung der Abtragleistung aufgrund der besseren

Kontaktwahrscheinlichkeit wird im Rahmen der experimentellen Untersuchungen in Abschnitt 6.2.5 näher betrachtet. Neben einer hohen Kontaktwahrscheinlichkeit spielt die Form des Bearbeitungswerkzeugs eine wichtige Rolle, um einen gleichmäßigen Beanspruchungszustand auf die Rohrwand zu übertragen und damit einen gleichmäßigen Abtrag zu gewährleisten.

4.3.2 Werkzeugformen

In Abschnitt 4.3.1 wurde festgestellt, dass am freien Ende des Werkzeugträgers die kinetische Energie am größten ist. Für das Schlagverfahren stellt dies eine geeignete Stelle zum Befestigen des Werkzeugs dar. Zur Anbringung eines Werkzeugs wurde die Spitze des Werkzeugträgers plan gefräst und stirnseitig mit einer Bohrung und einem Gewinde versehen, sodass ein Werkzeug in Form einer Hülse auf dem zylindrischen Werkzeugträger befestigt werden kann. Zur Festlegung einer passenden Werkzeuggeometrie existiert eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten. In Abschnitt 4.2.2 wurden die wesentlichen Einflussfaktoren vorgestellt, die eine aus Keilen bestehende Werkzeuggeometrie definieren. Unter anderem können durch die Keilanordnung auf dem Werkzeug verschiedene Werkzeuggeometrien definiert werden. Die Keile können gemäß Tabelle 7 quer, längs oder schräg in Richtung der Rohrachse angeordnet werden. Im Rahmen einer Voruntersuchung wurden verschiedene Keilanordnungen untersucht. Das Ziel dieser Voruntersuchung war es, eine Vorauswahl für eine passende Werkzeuggeometrie zu treffen, die dann in experimentellen Untersuchungen in Kapitel 6 näher untersucht werden sollen. Es wurden daher im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Werkzeuggeometrien entwickelt und daraus die Keilanordnung quer, längs und schraubenförmig um die Werkzeugachse näher untersucht.



Abbildung 21: Werkzeuggeometrie mit $d = 56$ mm (von links): längs, schraubenförmig und quer zur Werkzeugachse angeordnete Keilformen. Bild rechts: Bruch von Werkzeugkanten aufgrund eines kleinen Keilwinkels

Die Ergebnisse haben aufgezeigt, dass jeweils die Stirnfläche des Werkzeugs, wie auch in Abbildung 17 (WFP 3) dargestellt, den Vortrieb des Werkzeugträgers beeinflusst. Eine große Stirnfläche, wie sie bei schraubenförmigen oder quer angeordneten Keilen vorliegt, wirkt sich

negativ auf den Vortrieb des Werkzeugs im Rohr aus. Diese stellt einen Widerstand dar und führt trotz der dynamischen Bewegung des Werkzeugträgers zu einem Feststecken des Werkzeugs im Rohr. Dabei kommt es zu einer wiederholten Belastung des Werkzeugs an derselben Stelle des Rohrs. Die schlagende Bewegung an der gleichen Stelle entfernt zwar die Ablagerungen, führt letztlich jedoch zu einer Beschädigung des Rohrs. Zwar tritt ein Feststecken bei der schraubenförmigen Keilanordnung im Vergleich zu einer quer zur Werkzeugachse angeordneten Keilgeometrie seltener auf, allerdings ist der Abtrag dort ungleichmäßig ausgeprägt. Der Grund hierfür liegt in dem nicht definierten Kontakt des Werkzeugs mit der Rohrinnenfläche. Am effektivsten hat sich die Keilanordnung längs zur Werkzeugachse gezeigt. Der beim Vorschub entgegengebrachte Widerstand ist hier am geringsten und lediglich von der vorderseitigen Flanke der Keile des Werkzeugs abhängig. Zusätzlich kann durch leichtes Modifizieren durch spitz zulaufende Keile der flankenseitige Widerstand reduziert werden. Möglichkeiten zur weiteren Optimierung der Werkzeuggeometrie sind bei allen drei Keilanordnungen gegeben. Diese wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Stattdessen wird aufbauend auf den Ergebnissen der Voruntersuchung die Keilanordnung längs zur Werkzeugachse als Werkzeuggeometrie festgelegt und die Untersuchungen in Kapitel 5 und 6 anhand dieser Anordnung durchgeführt.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Keilwinkel, der das Eindringen des Werkzeugs in die Ablagerungen mit beeinflusst. Zur Festlegung eines Keilwinkels wurden die drei Keilwinkel $\alpha_k = 30^\circ$, $\alpha_k = 60^\circ$ sowie $\alpha_k = 90^\circ$ untersucht. Bei dem vergleichsweise scharfkantigen Winkel von $\alpha_k = 30^\circ$ wurde ein gutes Eindringen in die Ablagerungen festgestellt, da die Krafteinleitung vorwiegend über die Kantenspitze erfolgt. Die hierbei auftretenden Kräfte zum Eindringen in das Material sind bei einem kleinen Winkel deutlich geringer. Anhand der Formel 2-3 gemäß Evan [Eva-66] wurde in Abschnitt 2.3.2 analytisch aufgezeigt, dass, je kleiner der Keilwinkel gewählt wird, die Eindringkräfte im Material umso kleiner ausfallen. Der Keilwinkel kann jedoch nicht beliebig klein gewählt werden, da auch die Festigkeit und die Stabilität der Keile deutlich herabgesenkt werden. Die Vorversuche mit dem Keilwinkel $\alpha_k = 30^\circ$ haben auch einen starken Verschleiß durch Herausbrechen der Keile gezeigt. Dies entspricht den Beobachtungen von Whitecker [Whi-73], dass bei einem Keilwinkel $\alpha_k = 45^\circ$ ein zu großer Festigkeitsabfall eintritt und daher Keile größer 45° sein sollten. Ein allzu großer Keilwinkel ist ebenfalls nicht zu empfehlen. Bei dem Werkzeug mit einem Keilwinkel von 90° ist die Einbringung in die Ablagerungen deutlich schlechter ausgeprägt, da diese durch die Seitenfläche stark behindert wird und die Beanspruchung der Ablagerungen durch den flächigen Kontakt vergleichsweise klein ausfällt. Vorteilhaft wirkt sich hier die gute Stabilität der Keile aus, die aufgrund der großen Basis

gegeben ist. Der Keilwinkel $\alpha_k = 60^\circ$ stellt daher einen Kompromiss zwischen einer spitzen Ausführung und einer guten Stabilität des Keilwinkels dar. Im Vergleich zu einem Keilwinkel von $\alpha_k = 30^\circ$ konnte hier kein Ausbrechen der Keile festgestellt werden. Das in den Voruntersuchungen beobachtete Abtragverhalten war im Vergleich zu einem 90° Keilwinkel besser ausgeprägt. Als Werkzeuggeometrie wurden im Rahmen dieser Arbeit daher längs zur Werkzeugachse angeordnete Keile mit einem Keilwinkel von 60° festgelegt.

Um die Schlagenergie des Werkzeugträgers auf die Rohrrinnenfläche gleichmäßig zu übertragen, spielt der Parameter Keilanzahl eine wichtige Rolle. Die maximale Anzahl der Keile ist durch die Mantelfläche des Werkzeugs und damit durch den Werkzeugdurchmesser begrenzt. Die notwendige Keilanzahl des Werkzeugs bei einem Anwendungsfall hängt von verschiedenen Randbedingungen wie zum Beispiel dem Bruchverhalten und dem Wirkungsbereich einer einzelnen Kante sowie von dem Bewegungsverhalten des Werkzeugträgers ab. Je größer der Wirkungsbereich eines einzelnen Keils bei einem Aufschlag ist, umso weniger Keile sind notwendig, um einen gleichförmigen Abtrag auf der Rohrrinnenwand zu ermöglichen. Zudem ist die maximale Anzahl der Keile auch durch Fertigungsrestriktionen begrenzt. Es wird nachfolgend eine Abschätzung der erforderlichen Keilanzahl für ein Werkzeug getroffen. Damit beim Einschlag eines Keils die Ablagerungen vollständig durchdrungen werden können, ist es erforderlich, dass die Keilhöhe mindestens so groß ist wie die Ablagerungsdicke. Mit dieser Randbedingung und dem festgelegten Keilwinkel lässt sich die maximale Anzahl an Keilen an einem gegebenen Werkzeugdurchmesser abschätzen. Hierzu wurde anhand Abbildung 22 die nachfolgende Formel 4-4 zur Bestimmung der Keilanzahl für einen gegebenen Werkzeugdurchmesser hergeleitet. Die Keilanzahl ergibt sich demnach aus dem Verhältnis des Umfangs U beziehungsweise Radius R des Werkzeugs und der Basis b des Keils.

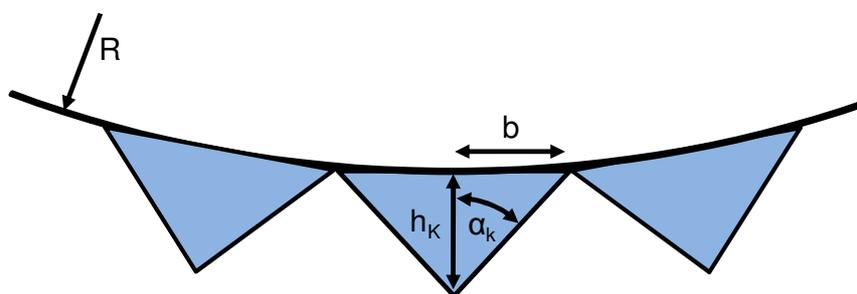


Abbildung 22: Abschätzung der erforderlichen Kantenanzahl bei gegebenem Radius, Keilwinkel und Keilhöhe des Werkzeugs

Mit einem Keilwinkel α_k , einer Keilhöhe h_k und einem Werkzeugradius R kann daher mit der nachfolgenden Gleichung die Keilanzahl K_a bestimmt werden.

$$K_a = \frac{U}{2 \cdot b} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{2 \cdot h_k \cdot \tan(\alpha_k)} = \frac{\pi \cdot R}{h_k \cdot \tan(\alpha_k)} \quad \text{Formel 4-4}$$

mit den Parametergrößen:

K_a	[-]	Keilanzahl
U	[mm]	Umfang Werkzeug
R	[mm]	Radius Werkzeug
h_k	[mm]	Keilhöhe
α_k	[°]	Keilwinkel

Dabei gilt, dass die Keilhöhe der Ablagerungsdicke d entspricht. Für ein Werkzeug mit dem Radius $R = 56 \text{ mm}$ und einem Keilwinkel von $\alpha_k = 60^\circ$ sowie einer Ablagerungsdicke von $d = 3 \text{ mm}$ beziehungsweise einer Keilhöhe $h_k = 3 \text{ mm}$ ergibt sich eine maximale Anzahl von 16,9 Keilen. Diese Zahl wurde aufgrund fertigungsbedingter Restriktionen auf 16 Kanten abgerundet. Die Keillänge eines einzelnen Keils wurde auf 50 mm begrenzt. Der Werkzeugträger erlaubt aufgrund seiner länglichen Form zwar weitaus größere Keillängen, jedoch ist dies aufgrund der Neigung des Werkzeugträgers bei Einschlag auf die Ablagerungen nicht sinnvoll. Wie aus Abbildung 17 (WFP 2) zu erkennen ist, ist unter einem Neigungswinkel φ_n die maximal mögliche Kontaktzone begrenzt und kann daher auch durch eine größere Keillänge nicht vergrößert werden. Der Neigungswinkel des Werkzeugträgers ändert sich mit der Eindringtiefe des Werkzeugträgers und hängt vom Ausgangszustand des Abstands zwischen Werkzeug und Rohrrinnenwand ab. Die gewählte Keillänge mit $l = 50 \text{ mm}$ ist ausreichend groß gewählt, sodass beim Schlag stets der maximal mögliche Kontakt bei dem gegebenen Neigungswinkel und Abstand zur Rohrrinnenwand möglich ist.

Anhand der Vorgehensweise in diesem Abschnitt wurde die Gestaltung der Werkzeuggeometrie festgelegt. Die Werkzeuggeometrie besitzt einen Keilwinkel $\alpha_k = 60^\circ$, eine Keillänge $l = 50 \text{ mm}$, einen Durchmesser $D_A = 56 \text{ mm}$ sowie eine Keilanzahl $K_a = 16$. Anhand dieser Parameter können die verschiedenen Möglichkeiten zur Optimierung des Werkzeugs erkannt werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird dieses Werkzeug als Standardwerkzeuggeometrie betrachtet.

4.4 Transport und Einschluss der Ablagerungen

Bei der letzten Funktion in der Abtragsequenz in Tabelle 6 geht es um den „Transport der Ablagerungsstücke“ aus dem Rohr heraus. Bei dem hochfrequenten Schlagen der Werkzeugspitze auf die Ablagerungen wird die Ablagerungsschicht zertrümmert. Dabei werden Ablagerungsstücke unterschiedlicher Korngrößen gebildet, die aus dem Rohr heraus transportiert werden müssen. Aufgrund des spröden Charakters der Ablagerungen ist mit einer

Staubbildung zu rechnen. Ein Freisetzen der kontaminierten Stäube sollte dabei verhindert werden, da sonst die Gefahr einer Kontaminationsverschleppung gegeben ist. Da die Ablagerungen kontaminiert sind, ist es zweckmäßig, diese direkt und ohne weitere Handhabung in ein sicheres Behältnis zu befördern. Für den Transport der Ablagerungsstücke existieren unterschiedliche Möglichkeiten. Durch eine Neigung des Rohrs können die Ablagerungsstücke aufgrund der Schwerkraft aus dem Rohr heraus transportiert werden. Stäube oder feinkörnige Ablagerungsstücke können jedoch im Rohr verweilen, aufgewirbelt werden und an beiden Enden unkontrolliert austreten. Für einen zügigen und sicheren Abtragprozess ist daher ein aktiver Transport der herausgelösten Rückstände aus dem Rohr erforderlich. Aufgrund der geschlossenen Rohrgeometrie ist die Erzeugung einer gerichteten Strömung im Rohr geeignet, um die Ablagerungsstücke und Stäube sicher und zügig heraus zu transportieren, sobald sie infolge des Abtrags aus der Rohrwand herausgelöst worden sind. Idealerweise soll der Transport der Ablagerungen in der Bewegungsrichtung des Werkzeugträgers erfolgen, da dort der Transportweg nicht durch den Werkzeugträger behindert ist. Die Dimensionierung einer pneumatischen Förderung von Feststoffen in der Rohrleitung ist von unterschiedlichen Parametern wie der Rohrgeometrie, dem Druckverlust in der Rohrleitung, der Partikelform und der Partikelgröße abhängig. Es ist davon auszugehen, dass beim Abtragprozess aufgrund der schlagenden Beanspruchung eine Zerkleinerung der Ablagerungen mit einem großen Anteil an Feinmaterial vorliegen wird und der pneumatische Abtransport deswegen keine großen technischen Probleme darstellt. Es wird daher nachfolgend keine Dimensionierung der pneumatischen Förderung vorgenommen. Eine ausreichend starke Industriesauganlage mit passendem Auffangbehältnis mit Filterung der Abluft soll hierbei den Anforderungen genügen.

Der Vorschub des Werkzeugträgers und des Werkzeugs durch das Rohr soll durch die Strömung im Rohr nicht beeinträchtigt werden. Die Bewegung des Werkzeugträgers im Rohr kann durch Ziehen oder Drücken des Werkzeugträgers erfolgen. Damit der Abtragprozess durch die Vorschubeinrichtung nicht beeinflusst wird, ist es zweckmäßig, die Wirkung des Vorschubs im WFP A der Abbildung 15 zu realisieren. Die Übertragung einer Kraft zur Bewegung des Werkzeugträgers kann an dieser Stelle durch die flexible Welle erfolgen. Der Vorschub sollte vorzugsweise bedarfsgerecht gesteuert und in Abhängigkeit der Abtragleistung erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Vorschub des Werkzeugträgers über zwei Rollen realisiert, die die flexible Welle in das Rohr hineindrücken beziehungsweise herausziehen. Die genaue Ausführung der Vorschubeinheit wird in Abschnitt 6.1.3 vorgestellt.

4.5 Fazit und Einflussfaktoren zum Schlagverfahren

Es wurde ein Konzept des Abtragverfahrens mittels Schlagwirkung anhand des C&C-Ansatzes aufgestellt. Dabei wurden acht verschiedene Funktionen identifiziert (vgl. Tabelle 6), die den Abtragvorgang beschreiben. Die Funktionen werden durch unterschiedliche technische Systeme realisiert, die über Leitstützstrukturen und Wirkflächenpaare miteinander interagieren und das Abtragverfahren definieren. Der Werkzeugträger ist dabei eine wichtige Einheit, der die Schlagenergie bereitstellt. An dem Werkzeugträger ist das Werkzeug befestigt, das die Schlagenergie als Schlagkraft auf die Oberfläche der Ablagerungen überträgt. Dabei wird die Kraft durch eine Einspannvorrichtung aufgenommen, sodass ein Abtrag der Ablagerungen stattfinden kann. Die herausgelösten Ablagerungen werden dann durch eine Absaugeinheit pneumatisch aus dem Rohr heraus transportiert und in einem Auffangbehälter aufbewahrt. Am Ende der Abtragsequenz wird der Werkzeugträger über eine Vorschubeinheit zum nächsten Rohrquerschnitt bewegt und die Abtragsequenz erneut gestartet. Die unterschiedlichen technischen Einheiten des Abtragverfahrens können durch verschiedene Parameter in ihrer Funktion und Wirkung beeinflusst werden. In der Summe beschreiben sie das Schlagverfahren.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Wirkungen der ermittelten Parameter näher untersucht. In diesem Abschnitt sollen zunächst die verschiedenen Parametergrößen zusammengefasst und die Abhängigkeiten untereinander abgeschätzt werden. Bei den Parametergrößen handelt es sich um Einflussfaktoren des Werkzeugs, des Werkzeugträgers, des Prozesses und der Ablagerungen. Diese Einflussfaktoren haben eine Wirkung auf die beanspruchungsbedingten Parametergrößen wie die Schlagintensität, die Schlagrichtung und die Schlaghäufigkeit, die zusammen den Abtrag herbeiführen. Damit ergeben sich insgesamt vier verschiedene Gruppen, in die die einzelnen Parametergrößen eingeordnet werden können. Um einen Überblick über die vorhandenen Parameter des Verfahrens zu erhalten und die Beeinflussung untereinander abzuschätzen, wird eine Einflussmatrix erstellt. Dabei wird die Stärke des Einflusses der Parameter untereinander in drei Größen abgeschätzt. Das Ergebnis der Einflussmatrix gibt zum einen die Stärke des Einflusses eines Parameters auf die übrigen Größen wieder und zum anderen die Beeinflussbarkeit dieses Parameters durch die übrigen Parametergrößen. Anhand der Darstellung der Einflussmatrix kann erkannt werden, welche Parameter eine wichtige Rolle im Gesamtkonstrukt spielen und daher in den weiteren Untersuchungen näher betrachtet werden sollten. Zudem können anhand der Einflussmatrix kritische Parametergrößen erkannt werden, die einen großen Einfluss auf andere Parameter ausüben und gleichzeitig von anderen Parametern beeinflusst werden können. Die Ergebnisse der Einflussmatrix sind in der nachfolgenden Tabelle 9 im Detail aufgeführt. Die Einschätzung

der Beziehungen zwischen den einzelnen Parametern erfolgt anhand einer dreistufigen Punktbewertung. Dabei wird der Einfluss zwischen zwei Parametern entweder mit „kein Einfluss“ (0 Punkte), „geringer Einfluss“ (1 Punkt), „mittlerer Einfluss“ (2 Punkte) oder „starker Einfluss“ (3 Punkte) bewertet. Die Bewertung in der Tabelle 9 erfolgt horizontal, indem für jeden Parameter geprüft wird, wie stark dieser den jeweiligen anderen Parameter beeinflusst.

Tabelle 9: Einflussmatrix

Bewertung kein Einfluss: 0 geringer Einfluss: 1 mittlere Einfluss: 2 starker Einfluss: 3																Einflussstärke		
																Einflussstärke		
	Frequenz	Verschleiß	Keilanzahl	Festigkeit	Durchmesser	Vorschub	Schlaghäufigkeit	Ablagerungsdicke	Unwuchtmasse	Schlagverteilung	Keilwinkel	Exzentrizität	Schlagintensität	Keillänge	Drehung WT		Abtrag	Vorspannung
Frequenz	0	3	0	0	0	0	3	0	0	1	1	0	3	0	3	3	0	17
Verschleiß	0	0	0	0	2	0	1	0	0	1	3	0	3	0	1	3	0	14
Keilanzahl	0	3	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	1	0	1	3	0	14
Festigkeit	3	2	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	12
Durchmesser	0	1	3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2	0	1	3	0	12
Vorschub	0	3	0	0	0	0	3	1	0	1	0	0	0	0	0	3	0	11
Schlaghäufigkeit	0	3	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	0	0	3	0	11
Ablagerungsdicke	2	1	0	0	1	2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	0	10
Unwuchtmasse	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	3	0	0	2	0	9
Schlagverteilung	0	1	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	1	0	0	3	0	9
Keilwinkel	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	9
Exzentrizität	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	3	0	1	2	0	9
Schlagintensität	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	8
Keillänge	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	6
Drehung WT	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	1	0	5
Abtrag	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Vorspannung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
Beeinflussbarkeit	5	26	3	0	5	6	16	4	0	15	8	1	24	0	8	39	0	

In dem gegebenen Beispiel liegt ein starker Einfluss (3 Punkte) der Frequenz auf den Verschleiß, die Schlaghäufigkeit, die Schlagintensität, die Drehung des Werkzeugträgers und auf den Abtrag der Ablagerungen vor. Zudem kann ein schwacher Einfluss (1 Punkt) auf die Parameter Schlagverteilung und Keilwinkel angenommen werden. Die Summe der Einzelwertungen eines Parameters in der Horizontalen ergibt die kumulierte Einflussstärke des Parameters wieder. Entsprechend ergibt die Summe der vertikalen Bewertung die kumulierte Beeinflussbarkeit dieses Parameters durch andere Parameter an. Bei der Frequenz liegt in diesem Beispiel mit einer Punktzahl von 17 Punkten ein vergleichsweise einflussstarker Parameter vor. Gleichzeitig ist die Beeinflussbarkeit mit 5 Punkten vergleichsweise niedrig.

Die Ergebnisse der Einflussmatrix sind grafisch in Abbildung 23 dargestellt. Dabei wurde in dieser Abbildung die Beeinflussbarkeit jedes Parameters über die Einflussstärke aufgetragen. Parameter mit ähnlicher Punktebewertung wurden dabei in Gruppen zusammengefasst. Hierbei ergeben sich die vier Gruppen der Beanspruchung: Werkzeug, Werkzeugträger, Ablagerungen und Prozesse.

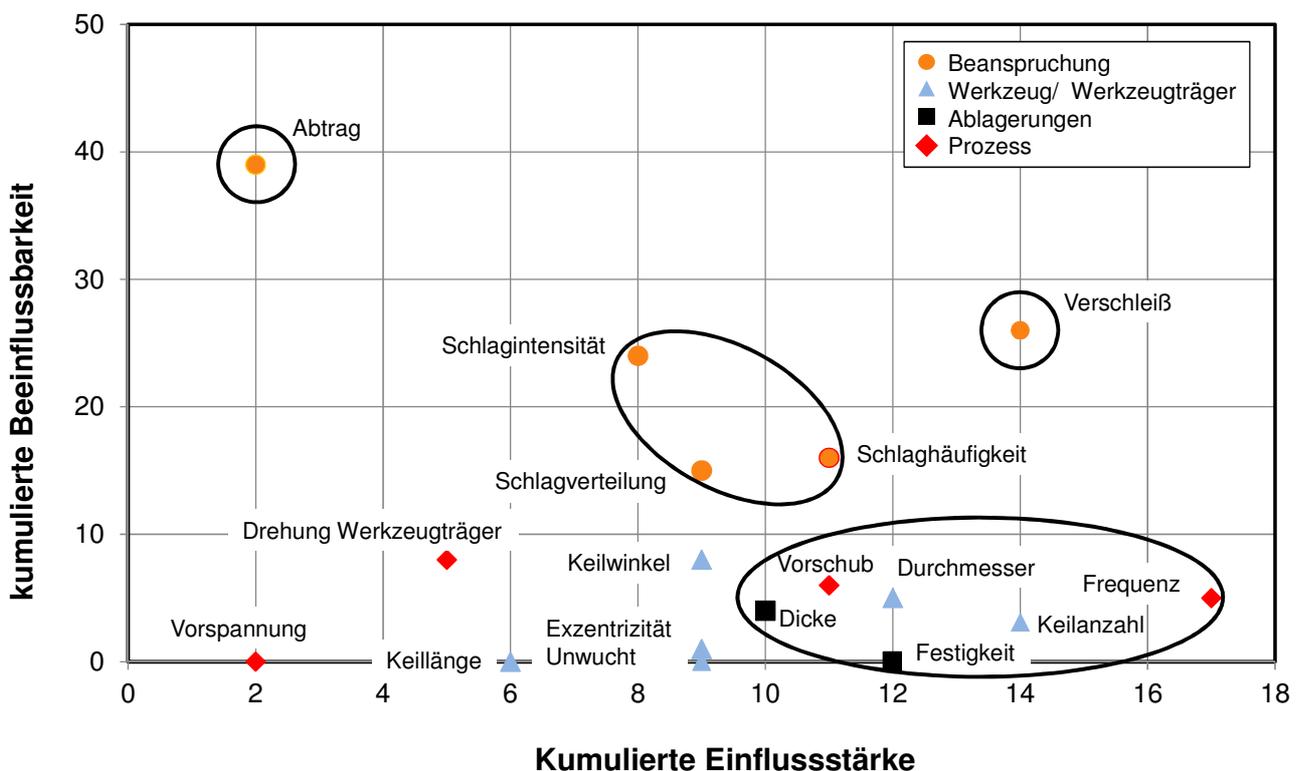


Abbildung 23: Einflussmatrix mit Parametern des Schlagverfahrens

In dieser Darstellungsform gehören die Parameter der Gruppe Beanspruchung zu den wichtigsten Kenngrößen des Schlagverfahrens, da sie direkt mit dem Abtrag zusammenhängen.

Die Beanspruchung im Rohr wird durch die drei Parameter Schlagintensität, Schlagverteilung im Rohr sowie Schlaghäufigkeit definiert. Entsprechend können diese Größen durch die übrigen Parameter unterschiedlich stark beeinflusst werden und nehmen deswegen in der Einflussmatrix einen ähnlich hohen Wert an kumulierter Beeinflussbarkeit ein. Durch die direkte Beeinflussung des Abtrags besitzen diese drei Größen eine mittlere Einflussstärke.

Die kritische Größe in der Einflussmatrix stellt der Parameter Verschleiß des Werkzeugs dar, der der Gruppe der Beanspruchung zugeordnet werden kann. Mit wachsendem Verschleiß wird die Werkzeugkontur verändert und damit auch die Abtragleistung. Gleichzeitig ist der Parameter Verschleiß eine Größe, die durch die übrigen Parametern stark beeinflusst werden kann und damit einen großen Wert an kumulierter Beeinflussbarkeit annimmt. Es handelt sich damit um eine wichtige Größe beim Schlagverfahren, die so klein wie möglich gehalten werden sollte.

Die prozessbedingten Einflussgrößen können während des Abtragsvorgangs in einem gewissen Bereich verändert werden. Zu diesen Größen gehören die Bewegungsparameter Vorschub, Frequenz und Drehung des Werkzeugträgers sowie die Vorspannung des Rohrs. Der Einfluss der Frequenz beziehungsweise die Drehzahl der Unwucht auf die Beschleunigung des Werkzeugträgers kann anhand der Formel 4-3 erkannt werden. Durch den quadratischen Einfluss auf die Beschleunigung hat die Frequenz auch einen starken Einfluss auf den Parameter Schlagintensität. Zudem führt die Änderung der Frequenz auch zu einer Änderung der Schlagfrequenz des Werkzeugs im Rohr und damit zur Beeinflussung der Schlaghäufigkeit. Da die Frequenz auch die Drehung des Werkzeugträgers mit beeinflusst, liegt ein weiterer Einfluss auf die Schlagverteilung vor. Damit ist der Parameter Frequenz eine wichtige Größe des Verfahrens, die sich in der Einflussmatrix durch eine hohe Einflussstärke zeigt.

Die Dauer der Schlagbeanspruchung in einem Rohrquerschnitt wird durch den Parameter Vorschub des Werkzeugträgers maßgeblich beeinflusst. Dieser bestimmt im Wesentlichen die Verweilzeit des Werkzeugs im Rohrquerschnitt und regelt damit die auf die Ablagerungen übertragene Höhe der Beanspruchung beziehungsweise die Schlaghäufigkeit. Damit ist auch diese Prozessgröße eine entscheidende Größe für die Beeinflussung des Abtrags. Aufgrund der zeitabhängigen Eigenschaft des Verschleißes übt der Vorschub auch auf diese Größe einen starken Einfluss aus. Ähnlich wie die Frequenz, kann diese Größe in einem vorab definierten Rahmen während des Abtragprozesses verändert werden.

Gemäß den Erläuterungen aus Abschnitt 4.3.1 ist die Drehung des Werkzeugträgers eine Größe, die durch die Randbedingungen im Rohr und durch die Auswahl der übrigen Parameter bestimmt wird. Da im Rahmen der betrachteten Ausführungsform des Schlagverfahrens keine

direkte Steuerungsmöglichkeit dieses Parameters gegeben ist, besitzt dieser Parameter in der Einflussmatrix eine geringe Beeinflussbarkeit. Der größte Einfluss ist dabei durch den Parameter Frequenz gegeben. Nichtsdestotrotz handelt es sich um eine wichtige Größe, da die Drehung die Beanspruchungsgröße „Schlagverteilung“ im Rohr beeinflusst und die Voraussetzung für einen gleichmäßigen Abtrag im Rohrquerschnitt schafft.

Anders als die übrigen Prozessgrößen ist die Vorspannung gemäß der Einflussmatrix eine vernachlässigbare Parametergröße. Die Vorspannung ist die Kraft, mit der das Rohr durch die Einspannungsvorrichtung (WFP E) festgehalten wird, damit die beim Abtragprozess wirkenden Kräfte von den Ablagerungen aufgenommen werden können. Die Vorspannung sollte daher ausreichend groß gewählt werden, damit das Rohr zum einen sicher in Position gehalten werden kann und zum anderen keinerlei Verluste der Schlagkraft durch Relativbewegungen des Rohrs auftreten können. Zwar ist es auch vorstellbar, dass die Vorspannung während des Abtragprozesses verändert werden kann, jedoch ist dabei keine Beeinflussbarkeit der übrigen Parameter gegeben. Der schwache Einfluss in der Einflussmatrix und auf die Schlagintensität ist darauf zurückzuführen, dass bei nicht ausreichender Vorspannung ein Verlust der Schlagintensität auftreten kann. Die Vorspannung kann konstruktiv einfach auf die vorliegenden Randbedingungen und die gestellten Anforderungen angepasst werden und stellt damit eine vernachlässigbare Größe für das Gesamtsystem dar.

Beim Schlagverfahren existiert eine Vielzahl von Einflussfaktoren des Werkzeugs und Werkzeugträgers, die eine große Einflussmöglichkeit darstellen. Für eine keilförmige Werkzeuggeometrie wurden insgesamt sieben verschiedene Parametergrößen ermittelt, die in Tabelle 7 aufgeführt sind. Die Ergebnisse der Einflussmatrix zeigen eine nur bedingte Beeinflussung dieser Parametergrößen an. Keillänge, Keilanzahl, Unwucht und Exzentrizität können beispielsweise kaum beeinflusst werden. Bei diesen Parametern liegt daher eine schwache Beeinflussbarkeit durch andere Parameter vor. Zudem besitzen Keillänge, Keilwinkel, Exzentrizität und Unwucht eine vergleichsweise geringe Einflussstärke. Diese Parameter sind daher nur bedingt von Bedeutung. Sie werden vor allem ablagerungsspezifisch zu Beginn der Dimensionierung festgelegt und unterliegen von vorn herein gewissen Restriktionen. Sie können dadurch nur eingeschränkt verändert werden. Unter diesen Parametern besitzt der Keilwinkel eine vergleichsweise große Beeinflussbarkeit, was auf verschleißfördernde Parameter zurückzuführen ist. Mit zunehmendem Verschleiß durch die schlagende Beanspruchung ist eine Abstumpfung der Keilspitze und damit eine Veränderung des Keilwinkels zu erwarten.

Die Parameter Keilanzahl und Durchmesser des Werkzeugs besitzen in der Einflussmatrix eine große Einflussstärke. Bei der Keilanzahl liegt dies an der direkten Beeinflussung der Schlagverteilung, der Schlaghäufigkeit sowie des Verschleißes. Bei zunehmender Keilanzahl wird zum Beispiel die Beanspruchung auf die Anzahl der Keile verteilt. Die Keilanzahl wird durch den Parameter Durchmesser beeinflusst, da dieser gemäß Formel 4-4 die maximale Anzahl an Keilen eines Werkzeugs festlegt. Indirekt beeinflusst der Durchmesser damit auch die Schlagverteilung und die Schlaghäufigkeit. Zudem ist durch den Parameter Durchmesser ein Einfluss auf die Schlagintensität gegeben. Der Grund hierfür ist, dass der Durchmesser des Werkzeugs den Abstand zwischen dem Werkzeug und der Ablagerungsoberfläche beeinflusst und damit indirekt auch den Wirkungsbereich des Werkzeugträgers.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die zwei Eigenschaften Festigkeit und Dicke der Ablagerungen berücksichtigt. Da diese Parameter die Randbedingungen der Anwendung definieren, können sie von den übrigen Parametern nicht beeinflusst werden. Im Vergleich zur Festigkeit ist beim Parameter Dicke eine schwache Beeinflussbarkeit in der Einflussmatrix zu erkennen. Dies liegt daran, dass beim fortschreitenden Abtragprozess die Ablagerungsdicke abnimmt und sie damit durch die übrigen Größen beeinflusst wird. Es wurde hier ein schwacher Einfluss angenommen, da wie bereits erwähnt die Ablagerungsdicke den Anwendungsfall definiert und dadurch nicht beeinflusst werden kann. Da beide Parameter die Anwendung definieren und alle übrigen Parameter auf diese beiden bezogen sind, besitzen sie eine große Einflussstärke in der Einflussmatrix.

Anhand der Einflussmatrix kann erkannt werden, wo der Fokus der weiteren Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit liegt. Diese Parameter sind in Abbildung 23 eingekreist. Der Fokus liegt zum einen auf den beanspruchungsrelevanten Parametern Schlaghäufigkeit, Schlagverteilung und Schlagintensität und zum anderen auf den einflussstarken Parametern Werkzeug und Werkzeugträger, Prozess sowie Ablagerungen.

Im nachfolgenden Kapitel wird zunächst der Beanspruchungszustand des Schlagverfahrens in Abhängigkeit der Einflussfaktoren untersucht. Ziel ist dabei die Definition des Beanspruchungszustands mithilfe eines geeigneten Modells unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren.

5 Modellbildung des Beanspruchungszustandes

Der mechanische Abtragprozess wird durch die Einbringung von Kräften in das Material und den daraus folgenden Wirkungen in Form von Dehnungen und Spannungen hervorgerufen. Um den Abtragprozess zu modellieren, ist die Kenntnis über die Art der hervorgerufenen Beanspruchung notwendig. Das Wissen über die Beanspruchung erlaubt Rückschlüsse auf die Bewegung des Werkzeugträgers, die gerade bei einem hochdynamischen Schlagverfahren aufgrund der Komplexität messtechnisch nicht erfasst werden kann. Im Rahmen dieses Kapitels werden experimentelle Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, ein Modell zur Beschreibung der Beanspruchung der Ablagerungen durch das untersuchte Schlagverfahren aufzustellen. Wie in Kapitel 4 erläutert, handelt es sich dabei um die Erfassung der Belastung der Ablagerungen durch eine Schlagbeanspruchung. Die Kenntnis über die Wirkung der Einflussfaktoren auf die Schlagbeanspruchung der Ablagerungen in Form eines Modells hilft, den Abtragprozess zu verstehen und zu optimieren. Dabei gilt, dass je nach den gegebenen Randbedingungen der Ablagerungen eine unterschiedlich hohe Intensität, Verteilung und Dauer der Beanspruchung zur Realisierung eines Abtrags notwendig ist. Die Kenntnis über die hervorgerufene Beanspruchung und die Einflussmöglichkeiten ist daher die Voraussetzung, um für eine Anwendungsaufgabe die passenden Größen zu wählen und einen gewünschten Abtrag zu ermöglichen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zur Erfassung sowie der theoretische Ansatz zur Definition der Beanspruchung vorgestellt. Die experimentellen Untersuchungen in diesem Kapitel wurden ohne die Berücksichtigung der Rohrablagerungen durchgeführt. Damit sollen störende Fremdeinflüsse durch die von den Ablagerungen entkoppelte Betrachtungsweise der Beanspruchung ausgeschlossen werden. Dadurch wird die Ermittlung der genauen Wirkungen der Einflussfaktoren erst ermöglicht. Die Beanspruchung beim Schlagverfahren besteht aus der Schlagwirkung, die eine unterschiedliche Intensität, Häufigkeit und Verteilung auf der Rohrrinnenfläche besitzt. Zur Erfassung dieser Größen wurde ein Versuchsstand aufgebaut und mit Messsensoren ausgestattet. Nachfolgend werden zunächst der Versuchsstand und der Versuchsplan vorgestellt. Anschließend wird die Methodik zur Auswertung der Messdaten beschrieben. Es wird dann aufbauend auf den experimentellen Untersuchungen eine univariate Datenanalyse durchgeführt, um die einzelnen Wirkungen der Einflussfaktoren auf die Beanspruchung des Rohrs zu untersuchen. Zum Schluss werden diese Wirkungen mathematisch beschrieben und in einem Gesamtmodell zur Erklärung des Beanspruchungszustandes zusammengeführt. Schematisch ist die Vorgehensweise in diesem Kapitel anhand Abbildung 24 zu erkennen.



Abbildung 24: Vorgehensweise zur Modellierung des Beanspruchungszustandes

5.1 Versuchsstand, Versuchsplan und Randbedingungen

Die dynamische Bewegung des Werkzeugs stellt eine besondere Herausforderung bei der Erfassung des Beanspruchungszustandes dar, obwohl der Bewegungsspielraum des Werkzeugs durch das Rohr begrenzt ist. Während des Abtragsvorgangs unterliegt das Schlagwerkzeug einer permanenten Beschleunigung. Bei jedem Schlag auf die Ablagerungen wird die kinetische Energie des Werkzeugs in Form eines Impulses übertragen. Dabei wird das Werkzeug von der Aufschlagstelle zur nächsten Aufschlagstelle beschleunigt und gibt bei jedem Aufprall die kinetische Energie in Form eines Schlages an die Rohrwand ab. Hierbei ist die Bewegung des Werkzeugträgers im Rohr nicht vorher bestimmbar, da diese von vielen Randbedingungen wie zum Beispiel der Schlagintensität, dem Auftreffwinkel und der Auftreffstelle sowie von der sich ergebenden Beschleunigung des Werkzeugs abhängt. Um die wirkende Beanspruchung des Rohrs zu erfassen, ist es notwendig, Annahmen zu treffen und die Komplexität beherrschbar zu machen. Der im nachfolgenden Abschnitt beschriebene Versuchsstand ist darauf ausgelegt, die Schlagbeanspruchung im Rohr zunächst unter idealisierten Bedingungen zu erfassen. Der Schlag tritt jeweils an der Kontaktstelle zwischen dem Werkzeug und der Rohrwand auf. Aufgrund der dort wirkenden hohen Abbremsbeschleunigungen kommt es kurzfristig zu einer hohen Krafteinwirkung. Die direkte Messung des Schlages an der Kontaktstelle ist daher nicht möglich. Stattdessen wird die Wirkung des Schlages an der Rohraußenwand ermittelt und daraus die Beanspruchung des Rohrs hergeleitet. Dabei wird der Schlag als eine Kraft angesehen, die durch Richtung und Intensität beschrieben werden kann. Innerhalb einer vorgegebenen Zeitdauer wird das Rohr durch die vielen Einzelschläge unterschiedlicher Intensitäten beansprucht. Die Beschreibung der Verteilung dieser Schläge auf der Rohrwandfläche ist die gesuchte Beanspruchung des Rohrs.

5.1.1 Versuchsstand und Messung der Schlagkraft

Beim Abtragprozess wird zu einer vorgegebenen Zeitdauer eine bestimmte Länge des Rohrs beansprucht. Das Werkzeug schwingt mit einer vorgegebenen Frequenz und bewegt sich aufgrund des Vorschubs durch das Rohr. Die Beanspruchung wird dadurch allmählich auf die gesamte Rohrwandfläche übertragen. Dabei wird nachfolgend angenommen, dass Aussagen über die Beanspruchung in einem betrachteten Rohrstück der Länge 100 mm auf die Beanspruchung des gesamten Rohrs proportional übertragen werden können. Die

Untersuchungen zur Erfassung der Beanspruchung werden daher an einem Rohrstück durchgeführt. Zur Erfassung der Schlagkraft in einem Rohrstück wurde der in Abbildung 25 dargestellte Versuchsstand aufgebaut. Dieser besteht aus einer massiven, achtkantigen Sensoraufnahme, die über vier Rechteckwinkel mit einer Bodenplatte befestigt ist. Die ebenfalls massive Bodenplatte besteht aus Stahl und ermöglicht eine ebene und bewegungsfreie Lagerung der Sensoraufnahmen. Um den Versuchsstand schwingungstechnisch zu entkoppeln, ist die Bodenplatte über eine Dämpfungsmatte mit dem Boden befestigt. An jeder zweiten Innenseite des Achtecks ist jeweils ein Scherkraftsensor des Herstellers HKM-Messtechnik GmbH vom Typ SK 1.2 mit einer maximalen Kraftaufnahme von 10 kN und einer internen Messfrequenz von 8 kHz angebracht. Die vier Scherkraftsensoren des Versuchsstands sind damit 90° zueinander positioniert, sodass die Messung der Schlagkraft und die Schlagrichtung in der von den Sensoren aufgespannten Ebene durch die Kombination der Schlagsensoren erfasst werden kann. Zwischen den vier Scherkraftsensoren befindet sich das betrachtete Rohrstück, an dem die Beanspruchung ermittelt werden soll. Das Rohr wird kraftschlüssig an den vier Seiten von vier Stiften gehalten, die direkt mit den vier Sensoren verbunden sind. Die Stifte mit einem Durchmesser von 14 mm sind mit einem Gewinde versehen und liegen damit zum einen flächig an der Rohraußenwand an, zum anderen sind sie gleichzeitig über eine Schraubenmutter mit dem jeweiligen Scherkraftsensor verbunden. Die Bewegung der Schraubenmutter verändert die Lage der Stifte und damit die Vorspannung des Rohrs. Durch das Verstellen der jeweiligen Schraubenmutter kann daher eine Vorspannkraft auf das Rohr aufgebracht werden. Die Höhe der Vorspannkraft kann dabei direkt durch die Scherkraftsensoren angezeigt werden. Durch einen Vergleich der Werte aller vier Scherkraftsensoren kann sichergestellt werden, dass das Rohr von vier Seiten gleichmäßig vorgespannt ist. Mit den eingesetzten Scherkraftsensoren, die durch die Schraubenmutter vorgespannt sind, kann axial die Wirkung der Schlagkraft an der Rohraußenwand gemessen werden. Durch das Zusammenschalten der vier zueinander um 90° versetzt angeordneten Scherkraftsensoren können die Schlagrichtung sowie die Amplitude der Kraft in der von den Scherkraftsensoren aufgespannten Ebene gemessen werden. Um einen störenden Einfluss der Querbeanspruchung der Stifte und damit der Sensoren zu verringern, sind die vier Auflagestellen der Stifte an der Rohraußenwand plangefräst. Bei einem Schlag in Richtung eines Sensors wird das Rohr damit in Richtung des Schlages geführt. Durch die Vorspannung der Sensoren kommt es beim Schlag im Rohr zu einer Änderung der eingestellten Vorspannung im Rohr. Durch die Erfassung dieser Änderung kann die Amplitude des Schlages ermittelt werden. Darüber hinaus kann mithilfe der vier Sensoren die Schlagrichtung bestimmt werden.

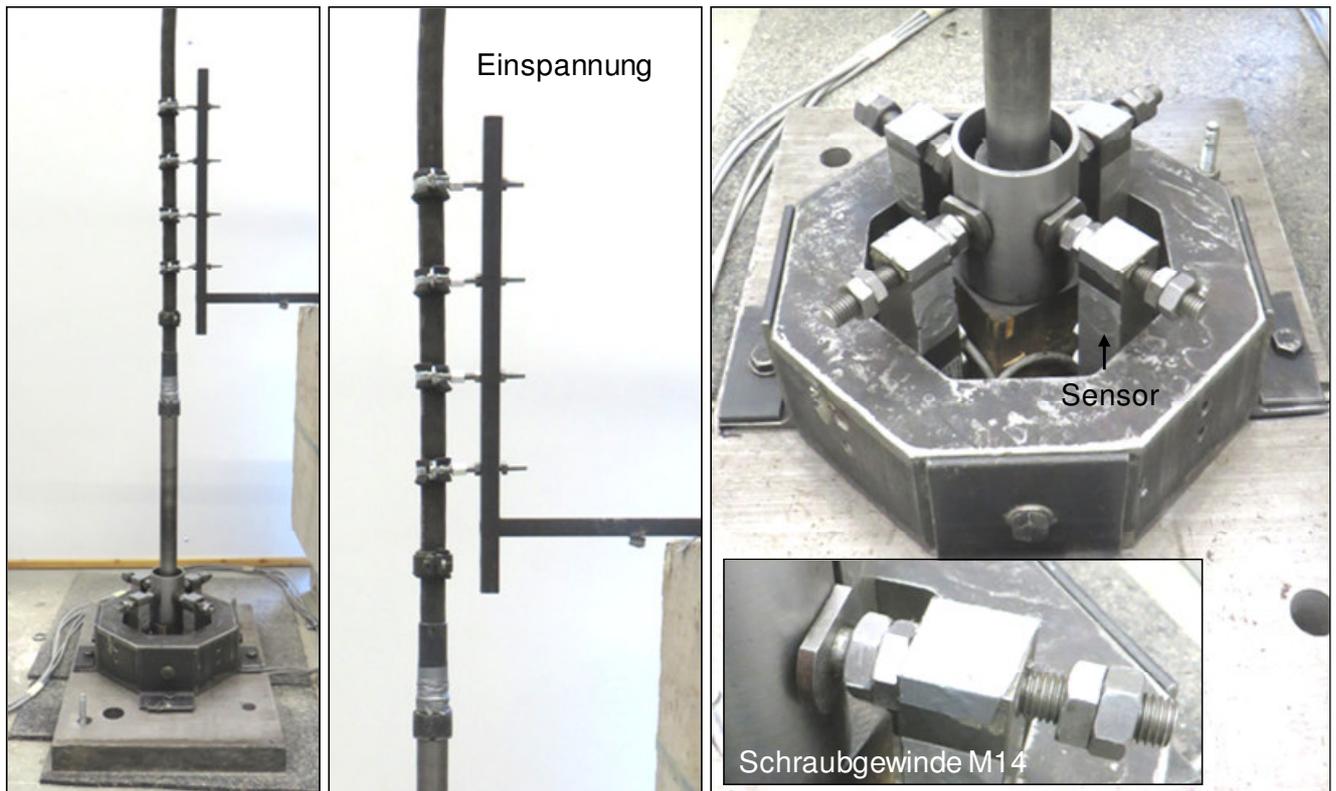


Abbildung 25: Gesamtbild des Versuchsstandes (links), der Einspannung (Mitte) und Aufnahme mit Sensoren und Rohr (rechts)

Zur Untersuchung der Schlagbeanspruchung im Rohr wird der Werkzeugträger vertikal im Rohrstück positioniert, sodass die Schlagwirkung unabhängig vom Einfluss der Schwerkraft gemessen werden kann. Die flexible Welle des Werkzeugträgers ist mithilfe von fünf Rohrschellen mit einer Führungsstange fixiert. Die Position der flexiblen Welle kann direkt an den Einspannstellen (siehe Abbildung 25) in der horizontalen und vertikalen Richtung verändert werden. Damit ist es möglich, den Werkzeugträger exakt im Rohr auszurichten und zu positionieren. Zudem kann die freie Einspannlänge der flexiblen Welle durch das Entfernen der Einspannelemente angepasst werden. Die freie Einspannlänge ist der Abstand von dem letzten Einspannelement bis zum Werkzeugträger und legt die Beweglichkeit der flexiblen Welle im Rohr fest. Die Länge der freien Einspannung beträgt im Ausgangszustand 100 mm. Bei der Durchführung der Versuche befinden sich die Spitze des Werkzeugträgers und damit das Werkzeug vollständig im Rohrstück. Die Kraftübertragung beim Schlag erfolgt in diesem Zustand durch die Werkzeugspitze auf die Rohrwand und anschließend über die Stifte auf die anliegenden Sensoren, sodass die Erfassung der Beanspruchung des Rohrs in Form der Schlagwirkung ermöglicht werden kann.

Zum Aufzeigen der Wirkungen eines Schlages ist in Abbildung 26 eine schematische Draufsicht des Versuchsstandes mit den vier angeordneten Scherkraftsensoren sowie einem eingespannten Rohr abgebildet.

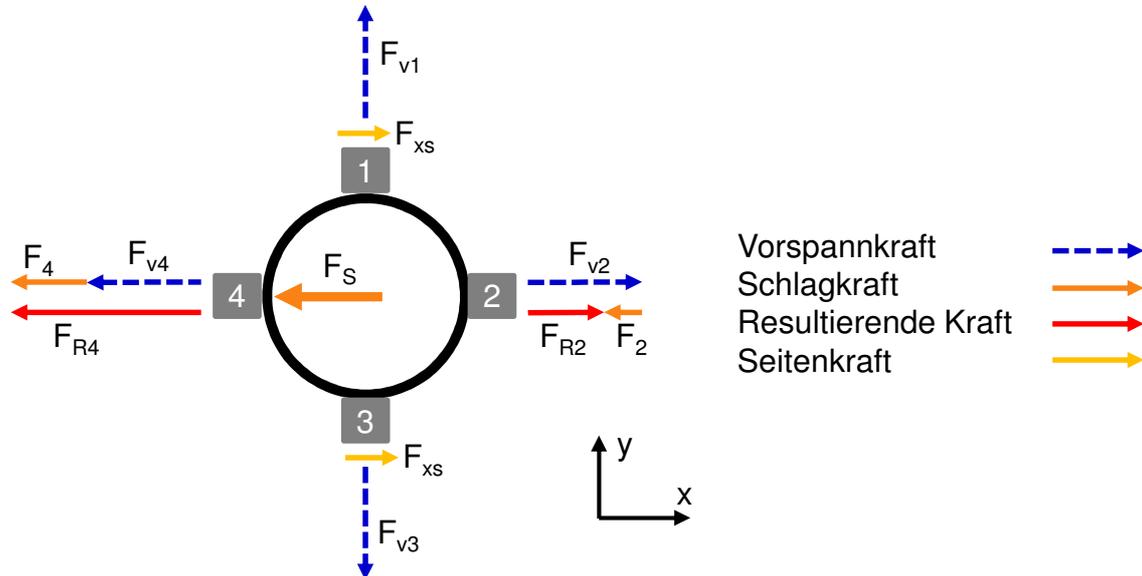


Abbildung 26: Darstellung der auftretenden Kräfte im Versuchsstand beim Schlag auf einen Sensor

Um die wirkenden Kräfte bei einem Schlag aufzuzeigen, sind in der Prinzipskizze die gemessenen Kräfte durch die Sensoren dargestellt. Das Rohr ist im Ausgangszustand mit der Kraft F_{v1-4} an vier Stellen vorgespannt. Der Schlag durch die Werkzeugspitze erfolgt in diesem idealisierten Fall direkt in der Richtung des Sensors Nr. 4 und wird durch die Kraft F_S wiedergegeben. Wie bereits erwähnt, ändert der Schlag die Vorspannung der Sensoren. In diesem Fall zeigt sich die Wirkung der Schlagkraft im Sensor Nr. 4 sowie in der Vorspannung des gegenüberliegenden Sensors Nr. 2. Damit wird die Schlagkraft auf die beiden Sensoren aufgeteilt. Daneben kommt es aufgrund der Vorspannung der seitlichen Sensoren Nr. 1 und Nr. 2 zu Reibungen in der Auflagefläche, sodass diese Sensoren quer in Richtung der Vorspannung auf eine Seitenkraft F_{xs} belastet werden. Aufgrund dieser Seitenkraft ist die gemessene Schlagkraft zumindest um diesen Anteil geringer als die Schlagkraft, die eigentlich aufgrund der kinetischen Energie des Werkzeugs kurz vor dem Aufprall zu erwarten wäre. Neben diesen Verlusten existieren weitere Verlustanteile, die zusätzlich zu einer Reduzierung der Schlagkraft führen. Die Höhe der Verluste aufgrund der Seitenkraft und aufgrund weiterer Verluste wird in Abschnitt 5.2.2 behandelt. Zur Messung der Schlagkraft, die letztlich auf das Rohr wirkt, muss in diesem Fall die resultierende Kraft der beiden Sensoren Nr. 2 und Nr. 4 berücksichtigt werden. Der Sensor Nr. 4 ist beim Aufschlag des Werkzeugs mit der

Vorspannkraft F_{V4} belastet und wird zusätzlich mit dem Anteil der Schlagkraft F_4 belastet. Der Sensor Nr. 2 ist mit der Vorspannkraft F_{V2} belastet und wird durch den Anteil F_2 der Schlagkraft entlastet. Die resultierende Kraft F_{R2} ist bei diesem Sensor geringer als die Vorspannkraft. Zur Ermittlung der Schlagkraft F_S aus den Sensordaten muss daher die Differenz der resultierenden Kräfte gebildet werden, Damit ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der Schlagkraft:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ -F_{R4} - F_S + F_{R2} + 2 \cdot F_{XS} &= 0 \\ \rightarrow F_S &= F_{R2} - F_{R4} + 2 \cdot F_{XS} \end{aligned} \quad \text{Formel 5-1}$$

mit den Parametergrößen:

F_{R2}/ F_{R4}	[N]	Resultierende Kraft des Sensors Nr. 2 bzw. Nr. 4
F_{XS}	[N]	Seitenkraft in x-Richtung
F_S	[N]	Schlagkraft

Das hier behandelte Beispiel zur Erfassung der Schlagwirkung stellt einen einfachen Sonderfall dar, der nur dann vorliegt, wenn der Schlag in Richtung eines Sensors erfolgt. Dadurch ist eine unkomplizierte Erfassung der Schlagkraft möglich. In der Realität besitzt das Werkzeug viele Kanten, die im Rohrrinneren an unterschiedlichen Stellen auftreten. Die Ermittlung der Schlagkraft unter solchen Randbedingungen ist deutlich komplexer, da das Werkzeug im Rohr unterschiedlichen Beschleunigungen ausgesetzt ist. Zum einen ist dies durch den Aufprall mit der Rohrwand und dem daraus erfolgten Rückprall gegeben und zum anderen durch die permanente Beschleunigung des Werkzeugs aufgrund der sich drehenden Unwuchtmasse. Bei Anregungsfrequenzen des Werkzeugträgers von über 100 Hz kommt es zu einer hochdynamischen und komplexen Beanspruchung des Rohrs, die messtechnisch schwer zu erfassen ist. Um die Komplexität der Beanspruchung zu reduzieren und die Beanspruchung messtechnisch greifbar zu machen, wird zunächst ein einfaches Werkzeug mit vier Keilen ausgewählt. Die einzelnen Keile des Werkzeugs sind jeweils in Richtung der jeweiligen vier Sensoren ausgerichtet. Zudem wird die Drehung des Werkzeugträgers über eine Befestigung an der Schnittstelle zu WFP A blockiert. Damit ist sichergestellt, dass die Schlagbeanspruchung jeweils in Richtung der Sensoren erfolgt und somit einfach ermittelt werden kann. Es wurde dabei angenommen, dass die gemessene Beanspruchung durch ein Werkzeug mit vier Keilen auf ein Werkzeug mit beliebigen Keilen übertragen werden kann. Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen wird daher überprüft, inwieweit diese Annahme gerechtfertigt ist. Die Ermittlung der Wirkungen der Einflussfaktoren auf die Beanspruchung des Rohrs wird daher nachfolgend für diesen vereinfachten Fall durchgeführt. Im nachfolgenden Abschnitt werden der

Versuchsplan für die Untersuchung der Schlagbeanspruchung sowie die weiteren Randbedingungen des Versuchsstandes vorgestellt.

5.1.2 Versuchsplan und Randbedingungen

Aufbauend auf den theoretischen Überlegungen von Kapitel 4 sollen ausgewählte Parameter in dem Versuchsstand untersucht werden. Es werden die Wirkungen von insgesamt fünf Parametern, die in der Einflussmatrix in Abbildung 23 identifiziert wurden, auf die Beanspruchung des Rohrs untersucht. Die Frequenz ist einer der wichtigsten Parametergrößen und wird, wie in Tabelle 10 aufgeführt, in der möglichen Permutation von 65 Hz bis 210 Hz untersucht. In den Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass bei Frequenzen unterhalb von 65 Hz die Beschleunigungen des Werkzeugträgers gering sind und keine ausgeprägte Beanspruchung des Rohrs zu erkennen ist. Die obere Grenze von 210 Hz entspricht der maximalen Drehzahl des verwendeten Elektromotors des Typs M 3000 des Herstellers Wacker Neuson. Die Untersuchung des Beanspruchungszustandes in Abhängigkeit der Frequenz erfolgt in dieser Frequenzspanne in verschiedenen Frequenzabständen.

Tabelle 10: Variation der Frequenz

Parameter	Einheit	Variationsbereich												
Frequenz	[Hz]	65	95	118	135	150	160	170	185	190	195	200	206	210

Als zweite Größe wird der Einfluss des Vorschubs auf die Beanspruchung näher untersucht. Der Vorschub kann zwar aufgrund der Fixierung des Werkzeugträgers in Richtung der Rohrachse nicht direkt untersucht werden, stattdessen wird die äquivalente Größe der Beanspruchungszeit berücksichtigt. Dies ist die Zeitdauer, in der ein Rohrquerschnitt beim Bewegen des Werkzeugs durch das Rohr, beansprucht wird. Sie hängt damit von der Werkzeuglänge sowie von der Höhe des Vorschubs ab. Es wird angenommen, dass das Werkzeug beim Bewegen durch das Rohr den passierenden Rohrquerschnitt permanent beansprucht. Damit ist eine proportionale Beziehung zwischen der Werkzeuglänge und der Beanspruchungszeit gegeben. In der folgenden Tabelle 11 ist der Zusammenhang zwischen dem Vorschub und der Beanspruchungszeit des Rohrs für eine Werkzeugkante von 50 mm aufgeführt.

Tabelle 11: Beziehung zwischen der Beanspruchungszeit und dem Vorschub bei einer Werkzeugkantenlänge von 50 mm

Vorschub [mm/s]	10	5	2,5	1,67	1,25
Beanspruchungszeit [s]	5	10	20	30	40

In den nachfolgenden Abschnitten wird daher die Beanspruchungszeit variiert und daraus indirekt auf den Einfluss des Vorschubs auf die Beanspruchung geschlossen. In der Einflussmatrix ist der Durchmesser des Werkzeugs eine weitere wichtige Parametergröße. Durch die Veränderung des Durchmessers wird der Abstand zwischen dem Werkzeug und der Rohrwand variiert. Die äquivalente Größe für den Parameter Durchmesser ist daher der Abstand, der im Folgenden betrachtet wird. Um den Einfluss des Abstands zwischen dem Werkzeug und der Rohrwand zu untersuchen und alle weiteren Wechselwirkungen auszuschließen, wurde im Rahmen der experimentellen Untersuchungen der Rohrdurchmesser bei gleichbleibender Wandstärke des Rohrs und bei gleichbleibender Werkzeuggröße variiert. Der Abstand entspricht dabei der Strecke von der Werkzeugkante bis zur Rohrwand bei einer mittigen Zentrierung des Werkzeugs im Rohr. Der Einfluss des Abstands wird für den Bereich 2 mm bis 8 mm in 2-mm-Schritten untersucht.

Die Untersuchung des Parameters Abstand wird anhand verschiedener Rohre durchgeführt. In der folgenden Tabelle 12 sind die Abmessungen der berücksichtigten Rohre sowie die sich daraus ergebenden Abstände bei einem Werkzeugdurchmesser von 56 mm aufgeführt. Mit zunehmendem Abstand nimmt die Schlagwirkung aufgrund eines begrenzten Wirkungsbereiches des Werkzeugträgers ab. Daher werden Abstände, die größer als 4 mm sind, in der Versuchsplanung nicht berücksichtigt.

Tabelle 12: Rohrabmessungen und Abstand zwischen der Rohrwand und einem Werkzeug mit dem Durchmesser von 56 mm

Bezeichnung	Rohr 1	Rohr 2	Rohr 3	Rohr 4
D_A [mm]	66	68	70	72
D_i [mm]	58	60	62	64
Wanddicke [mm]	4	4	4	4
Abstand [mm]	1	2	3	4

Aufgrund der hohen Dynamik eines Werkzeugs mit hoher Keilanzahl ist die Untersuchung des Beanspruchungszustandes schwierig durchzuführen. Daher wird der Einfluss der Keilanzahl anhand eines Werkzeugs mit niedriger Keilanzahl untersucht. Es werden zunächst die Untersuchungen anhand eines Werkzeugs mit vier Keilen durchgeführt. Um zu überprüfen, ob die Untersuchungsergebnisse auf ein Werkzeug unterschiedlicher Keilanzahl übertragen werden können, wird zusätzlich ein Werkzeug mit zwei und acht Keilen berücksichtigt. Dabei wird der Werkzeugdurchmesser konstant gelassen, um den wechselwirkungsfreien Einfluss zu ermitteln. Die Geometrie der Keile des Werkzeugs (vgl. Abbildung 24) wird im Rahmen dieser Arbeit nicht

näher untersucht. Die Keillänge und der Keilwinkel des Werkzeugs wurden daher gemäß Abschnitt 4.3.2 bei jeweils 50 mm und 60° konstant belassen.

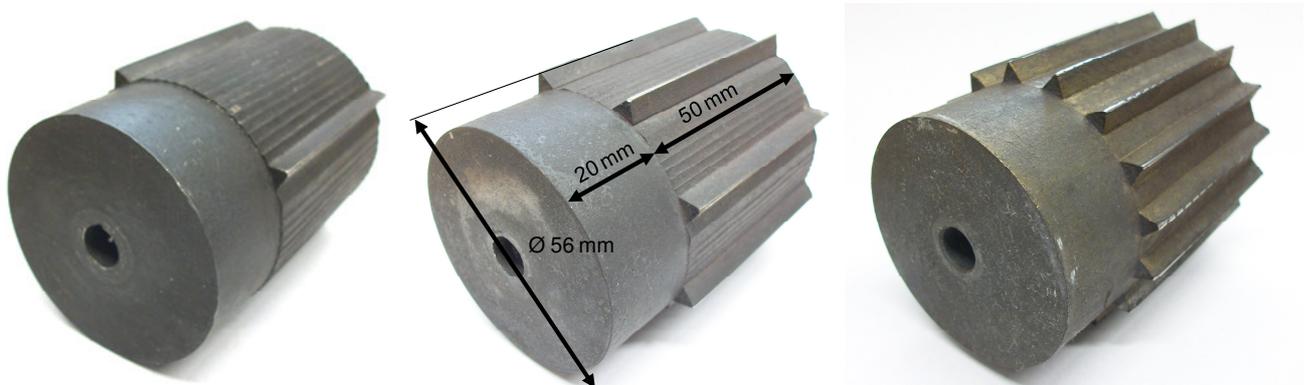


Abbildung 27: Werkzeuge mit unterschiedlicher Keilanzahl

In der Einflussmatrix wurde aufgezeigt, dass die Vorspannung des Rohrs einen schwachen Einfluss auf die Schlagintensität ausübt. Zur Überprüfung dieses Sachverhaltes wird nachfolgend auch dieser Einfluss näher untersucht, indem die Vorspannung durch die Veränderung der am Rohr anliegenden Stellschrauben variiert wird. Innerhalb der von den eingesetzten Scherkraftsensoren vorgegebenen Maximalkraft von 10.000 N wird die Vorspannung von 1250 N bis 7500 N in 1250 N Schritten verändert.

Der Abtragvorgang kann an einem vertikal oder horizontal angeordneten Rohr durchgeführt werden. Im Gegensatz zu einem vertikal gelagerten Rohr ist bei einer horizontalen Anordnung des Rohrs eine mittige Zentrierung des Werkzeugs im Rohr nicht gegeben. Das Werkzeug befindet sich aufgrund der Schwerkraft in der unteren Rohrhälfte. Um zu untersuchen, ob dadurch ein Unterschied zwischen der Beanspruchung der unteren und der oberen Rohrhälfte gegeben ist, wird die Größe „außermittige Zentrierung“ eingeführt. Damit soll der Einfluss eines nicht mittig zentrierten Werkzeugs im Rohr untersucht werden. Dabei wird in dem vertikal angeordneten Rohrstück die Position des Werkzeugs von der Rohrmitte aus variiert. Bei der maximalen Auslenkung aus der Mitte heraus berührt das Werkzeug die Rohrinnenwand. Zusätzlich wird in dieser Anordnung der Einfluss einer auf das Werkzeug wirkenden Kraft von 10 N untersucht. Ziel ist es dabei zu untersuchen, ob ein Einfluss der Gewichtskraft auf die Beanspruchung im Falle einer horizontalen Rohranordnung gegeben ist.

Wie bereits erwähnt, werden die Untersuchungen zur Erfassung der Beanspruchung des Rohrs an ein vertikal angeordnetes Rohrstück und damit ohne den störenden Einfluss der Schwerkraft durchgeführt. Abgesehen von der Versuchsreihe oben wird vor jedem Versuch das Werkzeug

mittig im Rohr ausgerichtet, sodass jeder Versuch unter den gleichen Randbedingungen durchgeführt werden kann.

Zusammengefasst ist in Tabelle 13 ein Gesamtüberblick über die Parameter und die jeweiligen Permutationen angegeben. Die Untersuchungsreihe zum Aufstellen des Modells hat einen Umfang von über 110 Einzelversuchen. Wenn nicht anders angegeben, werden die Untersuchungen anhand des Rohrs Nr. 3 durchgeführt. Dieses Rohr stellt die Standardgeometrie im Rahmen dieser Arbeit dar. Um die Ergebnisse statistisch abzusichern, wird bei jeder Parameterkombination zusätzlich die Frequenz variiert. Damit kann dann auch überprüft werden, ob eine Wechselwirkung mit anderen Parametern gegeben ist.

Tabelle 13: Parameter und Untersuchungsgrößen

Parameter	Einheit	Variationsbereich				
Beanspruchungszeit	[s]	5	10	15	20	25
Abstand	[mm]	1	2	3	4	-
Keilanzahl	[-]	2	4	8	-	-
Vorspannung	[N]	1.250	2.500	3.750	5.000	6.250
Außer mittige Zentrierung	[mm]/ [N]	0/ 0	2/ 0	3/ 0	3/ 10	-

Die Randbedingungen des Versuchsstandes werden jeweils konstant gelassen. Es werden fünf Einspannelemente für die flexible Welle benutzt. Die freie Einspannlänge der flexiblen Welle beträgt damit circa 100 mm. Dabei befindet sich das Werkzeug während der Versuchsdurchführung circa 10 mm im Rohrinernen und ist auf die Höhe der Scherkraftsensoren positioniert. Die Kanten der Werkzeugkeile sind jeweils auf einem der vier Sensoren ausgerichtet. Eine Drehung des Werkzeugträgers wird unterbunden, sodass das Rohr jeweils an der gleichen Stelle durch das Werkzeug beansprucht wird. Des Weiteren ist die Vorspannung des Rohrs durch die Stellschrauben der anliegenden Stifte auf circa 3700 N eingestellt. Vor jedem Versuch werden die Auflageflächen des Rohrs mit einem Ölfilm besprüht, um damit mögliche Einflüsse durch Reibungen in Form einer Seitenkraft zwischen den anliegenden Stiften und der Rohraußenfläche minimal zu halten. Die Messwerte der Sensoren werden über eine Messkarte auf einem Datenträger gespeichert. Die Abtastrate der Messkarte vom Typ NI USB 6212 wird vor dem Versuch auf das Maximum von 10 kHz eingestellt. Bei der Messung wird darauf geachtet, dass es eine Vorlaufzeit gibt, bis der Werkzeugträger die eingestellte Frequenz erreicht hat. Entsprechend wird bei der Analyse der Datenwerte diese Vorlaufzeit nicht berücksichtigt. Die Aufzeichnung der Messung wird durch das Programm LabView gesteuert.

Anschließend erfolgt die weitere Auswertung der Datenwerte mit der Software Matlab. Dort wird jeweils ein Ausschnitt aus 100.000 Daten beziehungsweise 10 s analysiert und die Beanspruchung hergeleitet. Die genaue Vorgehensweise zur Auswertung der Messergebnisse und das Herleiten der Beanspruchung aus den Messwerten werden im nachfolgenden Abschnitt erläutert

5.2 Methodik zur Erfassung des Beanspruchungszustandes

Ziel dieses Abschnitts ist die Vorstellung der Methodik, um aus den aufgezeichneten Datenwerten der Sensoren den Beanspruchungszustand des Rohrs herzuleiten. Aufgrund der sehr kurzen Schlagzeit erfolgt die Messwernerfassung mit den Sensoren während eines Versuchs mit einer Abtastrate von 10 kHz. Entsprechend liegen die Herausforderungen darin, aus den großen Mengen an Versuchsdaten die relevanten Beanspruchungsgrößen zu extrahieren und den Einfluss der Störgrößen bei der Analyse so klein wie möglich zu halten. Das Aufstellen des Beanspruchungszustandes erfolgt anhand der bereits aufgezählten Kriterien der Schlaghäufigkeit, der Schlagintensität und der Schlagrichtung. Hierzu müssen zunächst diese Größen aus den gemessenen Datenwerten abgeleitet und durch eine geeignete Darstellungsweise die Grundlage für einen Vergleich der Ergebnisse geschaffen werden. Nachfolgend wird zunächst erklärt, wie ein einzelner Schlag in Form der Schlagkraft aus der großen Datenmenge eines Versuchs ermittelt wird.

5.2.1 Datenanalyse zur Ermittlung der Schlagkraft

Die Aufzeichnung der Kräfte durch die Sensoren ist beispielhaft für eine Dauer von 40 s in Abbildung 28 dargestellt. Bei einem Großteil des Messsignals handelt es sich um Störgrößen wie zum Beispiel Schwingungen des Gesamtsystems oder das Rauschen der Sensoren, die mit aufgezeichnet worden sind. Die bei jeder Messung auftretenden Störgrößen sind dann als kritisch zu sehen, wenn sie die Messung des Kraftverlaufs eines Schlages verfälschen. Es ist daher wichtig, dass die Abklingzeit einer Schwingung aufgrund der Impulsübertragung zwischen dem Werkzeug und der Rohrwand möglichst klein gehalten wird, um die Messung des nachfolgenden Schlages nicht zu beeinflussen. Aufgrund der Dynamik des Schlagverfahrens, wie sie anhand des Schlagbildes in Abbildung 28 zu erkennen ist, muss die gegenseitige Beeinflussung der Messwerte überprüft werden. In Anhang 1 ist dasselbe Schlagbild in unterschiedlichen Auflösungen dargestellt. Jedes ausgeprägte Kraftmaximum entspricht dabei einem Schlag des Werkzeugs auf die Rohrwand. Anhand der weiteren Abbildungen in Anhang 1, die das Schlagbild in größerer Auflösung zeigen, sind der Schlagverlauf eines einzelnen Schlages sowie die jeweils kurze Abklingzeit der Schwingungen deutlich zu erkennen.

Eine mögliche Beeinflussung des nachfolgenden Schlages kann aufgrund der schwingungstechnischen Optimierung des Versuchsstandes vernachlässigt werden. Damit kann aus den Messsignalen ohne weitere Filterung die Schlagkraft direkt ermittelt werden.

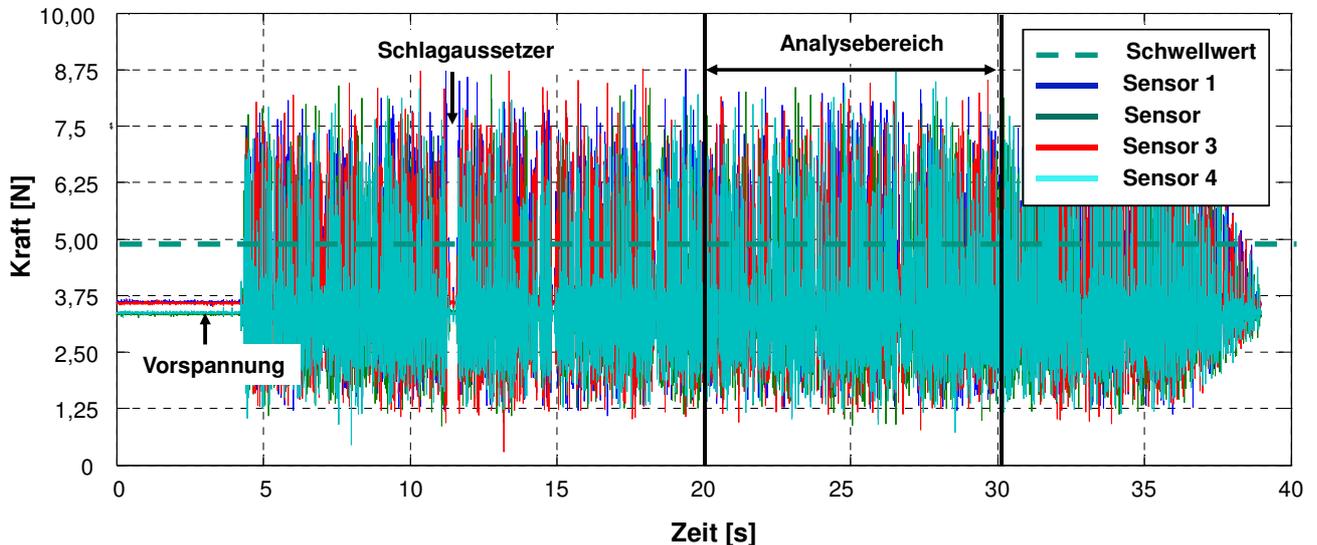


Abbildung 28: Kraftverlauf der Scherkraftsensoren während eines Versuchs

Zur Herleitung des Beanspruchungszustandes aus dem Schlagbild eines Versuchs muss jeder einzelne Schlag aus den Aufzeichnungen der Sensoren erkannt und im Beanspruchungszustand berücksichtigt werden. Aufgrund der großen Datenmenge sind ein automatisiertes Erkennen des jeweiligen Schlages und ein Herleiten des Beanspruchungszustands mittels eines Auswertalgorithmus zweckmäßig. Hierzu wurde mit der Software Matlab ein Algorithmus zur Schlagerkennung programmiert, der in den folgenden vier Schritten abläuft:

1. Auswahl des Analysebereichs und Aufteilen des Schlagbildes in Intervalle
2. Ermittlung der Schlagkraft und Schlagrichtung innerhalb der Intervalle
3. Gruppierung der Schlagkraft in verschiedene Schlagklassen
4. Herleitung der charakteristischen Größen des Beanspruchungszustandes

Im ersten Schritt der Analyse wird ein geeigneter Analysebereich der Zeitdauer von 10 s (entspricht gemäß Tabelle 11 einem Vorschub von: $v = 5 \text{ mm/s}$) ausgewählt. Hierzu ist es notwendig, dass die Dauer jedes Versuchs ausreichend groß gewählt wird, um Anlauf- und Endlaufeffekte des Werkzeugträgers bei der Versuchsauswertung ausschließen zu können. Die Auswahl dieses Analysebereichs erfolgt daher aus möglichst kontinuierlicher Schlagbeanspruchung und ohne einen Schlagaussetzer (siehe Abbildung 28). Bei einem Schlagaussetzer schwingt das Werkzeug, ohne dass es zu einer Schlagdynamik im Rohr

kommt. Dies tritt dann auf, wenn das Werkzeug vertikal im Rohr positioniert ist und der Wirkungsbereich des Werkzeugs kleiner als der Abstand zu der Rohrwand ist. In der Regel treten Schlagausschläger bei optimal gewählten Parametern vereinzelt im Schlagbild auf. Sobald es zu einem Kontakt mit der Rohrwand kommt, setzt die Schlagdynamik im Rohr wieder ein. Der Analysebereich von 10 s entspricht damit einem Auszug aus der Gesamtaufzeichnung eines Versuchs. Die Ergebnisse aus diesem Analysebereich erlauben Rückschlüsse auf die Charakteristika des Schlagbildes unter den gegebenen Randbedingungen und den eingestellten Parametern.

Im zweiten Schritt erfolgt die Schlagerkennung im Analysebereich, indem dieser zunächst in Intervalle gleicher Länge aufgeteilt wird. In jedem dieser Intervalle wird durch einen Vergleich der Messsignale untereinander der maximale Wert bestimmt. Dabei wurde die Intervallgröße ausreichend klein gewählt, sodass maximal nur ein Schlag innerhalb des Intervalls auftreten kann. Die erforderliche Größe des Intervalls wurde anhand der maximalen Werkzeugträgerfrequenz von 200 Hz bestimmt und bei der Auswertung konstant gehalten. Die Zeitdauer zwischen zwei nacheinander folgenden Schlägen beträgt bei dieser Frequenz circa 10 ms. Die Intervallgröße wurde daher auf 5 ms ($l = 100$ Datenwerte) festgelegt, sodass maximal ein Schlag innerhalb eines Intervalls erwartet werden kann. Bei allen kleineren Frequenzen treten die Schläge im Rohr in größeren Abständen auf, sodass die Größe des Intervalls für alle untersuchten Frequenzen ausreichend klein gewählt ist. Damit ist bei der Auswertung und Erkennung der Schläge ein einfacher Vergleich der Messsignale innerhalb eines Intervalls ausreichend, um einen Schlag zu erkennen.

In jedem Intervall wird zunächst der Maximalwert durch einen Vergleich der Messsignale bestimmt. Anschließend erfolgt der Vergleich dieses Wertes mit einem Schwellwert. Der Schwellwert ist die Entscheidungsgrundlage für die Erkennung eines Schlages. Der Schwellwert wurde so festgelegt, dass der Großteil des Rauschens und der Schwingungen aufgrund des Abklingens unterhalb dieses Wertes liegt. Der Maximalwert innerhalb eines Intervalls, der oberhalb des Schwellwertes liegt, ist damit als Schlag beziehungsweise Schlagkraft definiert. Der Wert des Schwellbereichs wurde für jeden Sensor dynamisch festgelegt und entspricht 30 % des maximalen Schlagwertes eines Sensors innerhalb des Analysebereichs. In Anhang 1 und in Abbildung 28 ist die Höhe des Schwellwerts für das Schlagbild eingezeichnet. Mithilfe dieser Vorgehensweise können die einzelnen Schläge aus dem Schlagbild identifiziert und einem der Sensoren zugeordnet werden. Nach der Analyse des Schlagbildes liegen Schlagwerte unterschiedlicher Intensitäten vor. Das Herleiten des Beanspruchungszustandes aus diesen Rohrwerten wird mithilfe der deskriptiven Datenanalyse durchgeführt.

5.2.1.1 Deskriptive univariate Datenanalyse

Die deskriptive, univariate Datenanalyse ermöglicht, mithilfe der Methoden der Statistik Zusammenhänge aus Datensätzen zu erkennen und diese anhand einzelner Merkmale zu beschreiben, sodass das Wesentliche erkannt werden kann. Aus den Schlagwerten der Versuchsauswertung werden mit dieser Methodik die relevanten Zusammenhänge zur Beschreibung des Beanspruchungszustandes hergeleitet. Hierzu werden gemäß dem dritten Schritt die Schlagwerte zunächst nach deren Intensitäten kategorisiert. Um einen Vergleich der Schlagintensitäten untereinander zu ermöglichen, erfolgt eine Normierung der jeweiligen Schlagwerte mit der maximalen Schlagintensität. Diese tritt bei der maximalen Frequenz von 210 Hz auf und hat einen Wert von circa 7.500 N. Als Nächstes erfolgt die Einteilung der normierten Schlagwerte in verschiedene Schlagintensitätsklassen. Die benötigte Anzahl an Schlagklassen für die Klassifizierung wurde anhand der nachfolgenden Formel 5-2 von Struges¹⁷ [Stu-26] bestimmt.

$$K_n = 1 + 3,322 \cdot \log(n_0) \quad \text{Formel 5-2}$$

mit den Parametergrößen:

K_n	[-]	Anzahl der Klassen
n_0	[-]	Anzahl der Datenwerte

Dabei beträgt die Anzahl der Datenwerte $n_0 = 100$ (100 % = 7.500 N), da aufgrund der Normierung dieser Wert der maximalen Schlagintensität entspricht. Somit ergibt sich gemäß Formel 5-2 ein Klassenwert von $K_n = 8$. Der Wert der jeweiligen Klassenbreite ist entsprechend 12,5. Die verschiedenen Schlagintensitäten können nun einer der acht Schlagklassen zugeordnet werden. Die Anzahl der Schläge in einer Schlagintensitätsklasse ergibt die absolute Häufigkeit n_k . Die grafische Darstellung der absoluten Schlaghäufigkeit über die Schlagintensitätsklassen ergibt für das betrachtete Beispiel ein Histogramm, das den Beanspruchungszustand des Rohrs darstellt. Anhand dieser Darstellung ist zu erkennen, wie oft und mit welcher Intensität das Rohr während des Versuchs beansprucht worden ist. In der nachfolgenden Abbildung 29 links ist dies für eine Werkzeugkante sowie für eine Versuchsdauer von 10 s und eine Frequenz von 190 Hz dargestellt.

Die Schlagverteilung in Abbildung 29 links stellt die empirische Verteilung der Schlagintensitäten dar und besitzt die typische Form einer gaußschen Normalverteilung. Um die Datenwerte auf

¹⁷Die Formel von Struges gilt als Faustformel zur Abschätzung einer geeigneten Klassenanzahl K_n für eine gegebene Anzahl n_0 an Datenwerten.

eine Normalverteilung zu untersuchen, wird eine grafische Überprüfung der Datenwerte mittels eines Quantil-Quantil-Plots (QQ-Plot) sowie mithilfe eines Anpassungstests durchgeführt. Bei der grafischen Überprüfung werden die gemessenen beziehungsweise beobachteten Schlagintensitäten zunächst der Größe nach geordnet. Dann wird für jeden Datenwert der Erwartungswert aus einer theoretischen Verteilung berechnet („Quantil“). Anschließend werden aus den beobachteten und den erwarteten Werten Datenpaare gebildet und in einem Diagramm grafisch dargestellt. Liegt eine Übereinstimmung der beobachteten Werte aus der Messung mit den erwarteten Werten einer theoretischen Normalverteilung vor, so liegen die Werte in der grafischen Darstellung sehr nahe an einer winkelhalbierenden Geraden (45°-Linie) [Sch-09] [Ger-75].

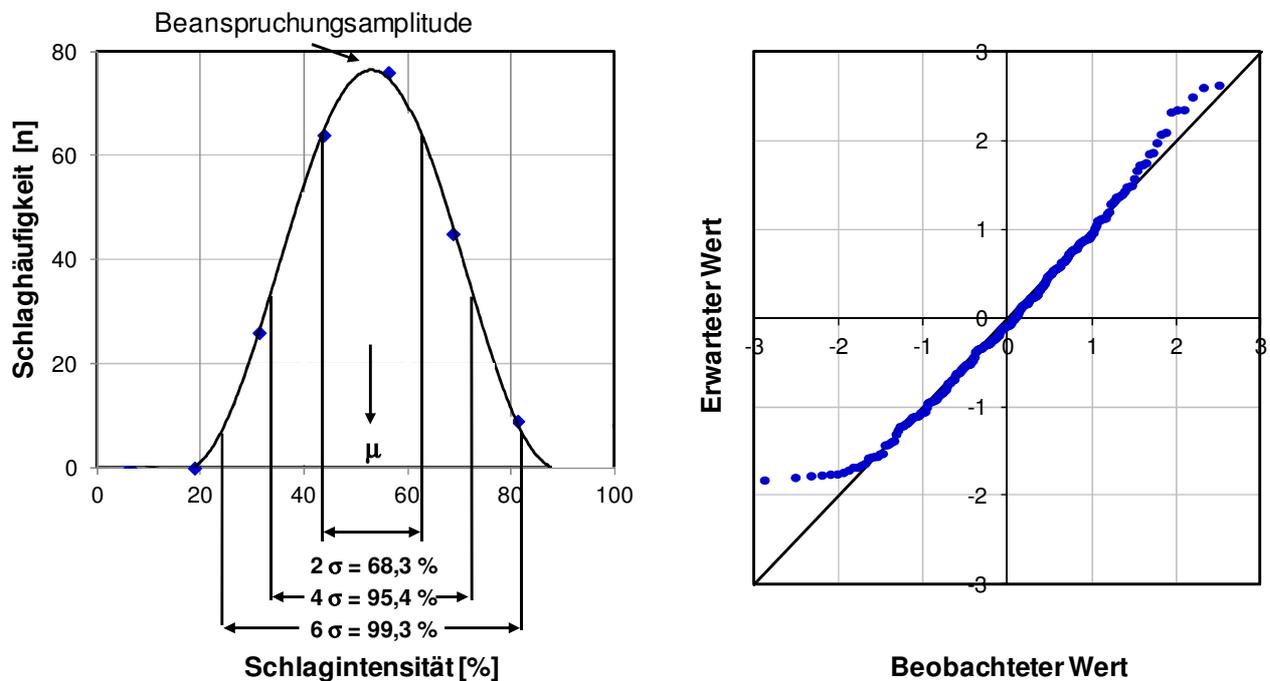


Abbildung 29: Schlagverteilung für eine Werkzeugkante mit charakteristischen Werten und QQ-Plot für eine Frequenz von 190 Hz

In Abbildung 29 rechts ist ein QQ-Plot für das links abgebildete Histogramm dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die meisten Schlagwerte auf der Winkelhalbierenden liegen. Die beobachteten Datenwerte entsprechen damit zum größten Teil einer theoretischen Normalverteilung. Es existieren Abweichungen von der Geraden vor allem im unteren Quantil sowie einige Ausreißer in den größeren Quantilen. Die Ursache hierfür liegt in dem 30%igen Schwellwert begründet, der bei der Analyse der Datenwerte verwendet worden ist, um störende Schwingungen des Gesamtsystems zu vernachlässigen und eine einfache Datenanalyse zu ermöglichen. Alle Datenwerte unterhalb dieses Schwellwertes werden als störende Schwingungen

wahrgenommen und in der Analyse nicht mehr berücksichtigt. Entsprechend sind bei den kleineren Quantilen Abweichungen vom Normalwert zu erkennen, da hier die beobachteten Datenwerte nicht vorhanden sind. Die Abweichungen in den höheren Quantilen stellen Ausreißer dar, wie sie üblicherweise im Rahmen experimenteller Versuchsdurchführungen nicht zu vermeiden sind.

Zwar ermöglicht die grafische Analyse eine anschauliche Überprüfung der Ergebnisse, jedoch ist die Interpretation mit Unsicherheiten behaftet. Daher wird zusätzlich zu dieser grafischen Analyse ein Anpassungstest¹⁸ nach Anderson-Darling durchgeführt. Der Anderson-Darling-Test (AD-Test) berechnet die Abstände zwischen einer empirischen Verteilung und der theoretischen Verteilungsfunktion. Dabei wird das Integral der quadratischen Abstände zwischen der empirischen und theoretischen Verteilung bestimmt, wobei die Randbereiche der Normalverteilung stark gewichtet werden. Dadurch bietet dieses statistische Testverfahren eine höhere Güte als vergleichbare Tests, die wie der Kolmogorov-Smirnov-Test lediglich die Maximalabstände zwischen den Verteilungen berücksichtigen und damit eine niedrige Güte besitzen. Nachfolgend wird kurz die Vorgehensweise für den Anderson-Darling-Test erläutert, für nähere Angaben zur Durchführung und Implementierung des Tests sei auf folgende Literatur verwiesen [Wil-10] [Dag-86] [Möl-03]. Ziel des AD-Tests ist die Überprüfung der Hypothese, dass die vorliegenden Daten einer Normalverteilung entsprechen (Nullhypothese). Die Durchführung des Tests verläuft in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten ab. Es wird zunächst aus den vorliegenden Daten eine AD-Teststatistik berechnet. Aus diesem Wert wird dann ein P-Wert (engl. Probability) aus Tabellen ermittelt. Der P-Wert gibt die Wahrscheinlichkeit für die Erfüllung der Nullhypothese gegenüber einem definiertem Signifikanzniveau¹⁹ α an. Ist der P-Wert größer als das Signifikanzniveau, so wird die Nullhypothese akzeptiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Überprüfung der Datenwerte anhand eines Matlab-Skripts mit einem Signifikanzniveau von 5 % ($\alpha = 0,05$) durchgeführt. Gemäß dem AD-Test ergeben die oben aufgeführten Datenwerte einen p-Wert von $p = 0,11$ der größer als das Signifikanzniveau von 0,05 ist. Die Hypothese der Normalverteilung gilt damit mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % als erfüllt.

¹⁸Ein Anpassungstest (engl. Goodness-of-fit-Test) ist ein Hypothesen-Test, der eine gegebene Verteilung (z.B. Normalverteilung) mithilfe eines bestimmten Verteilungsmodells überprüft. Dafür werden eine Nullhypothese sowie eine alternative Hypothese aufgestellt und danach wird geprüft, welche von beiden zutrifft. Die Nullhypothese geht davon aus, dass die gegebene Verteilung dem angenommenen Verteilungsmodell entspricht und dass sie nicht zufällig abweicht. Die Alternativhypothese besagt, dass die Annahme nicht zutrifft und damit sich die vorliegende Verteilung von der erwarteten Verteilung signifikant unterscheidet.

¹⁹Das Signifikanzniveau legt die Wahrscheinlichkeit fest. Diese darf, falls die Nullhypothese richtig ist, für eine Ablehnung anhand der Testergebnisse in diesem Fall nicht mehr als 5 % betragen.

Die Normalverteilung kann in diesem Fall zur Beschreibung des Beanspruchungszustandes verwendet werden. Anhand der Überprüfung auf Normalverteilung durch die beiden vorgestellten Methoden ist eine hohe Sicherheit gegeben, dass die Annahme der Normalverteilung der Schlagintensitäten zutrifft.

Aufgrund der Modellannahme der Normalverteilung kann die empirische Verteilung durch die beiden Kennzahlen „Erwartungswert“ beziehungsweise „Mittelwert“ und „Standardabweichung“ beschrieben werden. Der Verlauf der Normalverteilungskurve lässt sich analytisch mithilfe dieser beiden Kennwerte durch die Dichtefunktion $f(x)$ der Formel 5-3 wiedergeben.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad \text{Formel 5-3}$$

mit den Parametergrößen:

- μ Erwartungswert bzw. Mittelwert
- σ Standardabweichung

Über die Integration der Dichtefunktion in einem gegebenen Intervall kann die Wahrscheinlichkeit eines stetig verteilten Merkmals innerhalb der Intervallgrenzen beschrieben werden. Der Erwartungswert μ definiert die Stelle des höchsten Punktes in der Normalverteilungskurve. Die Standardabweichung σ beziehungsweise die Streubreite beschreibt die Verteilung der Werte um den Erwartungswert herum und definiert damit die Form der Dichtefunktion. Im Bereich $x = \mu - \sigma$ und $x = \mu + \sigma$ besitzt die Normalverteilungskurve jeweils einen Wendepunkt. In Abhängigkeit von der Standardabweichung können die Wahrscheinlichkeiten einer normalverteilten Variable x angegeben werden. In Abbildung 29 links sind diese Charakteristika der Normalverteilung eingetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von circa 99,3 % die Werte der Schlagintensitäten innerhalb des Bereichs $\pm 3 \sigma$ um den Erwartungswert herum verteilt sind. Basierend auf diesem Modellansatz der Normalverteilung und der stetigen Dichtefunktion können die Schlaghäufigkeiten beschrieben werden. Hierzu müssen zunächst der Erwartungswert sowie die Standardabweichung aus den diskret vorliegenden Messwerten bestimmt werden. Der Erwartungswert der empirischen Verteilung entspricht dem gewichteten arithmetischen Mittelwert, der wie folgt aus den experimentellen Untersuchungen berechnet werden kann:

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum n_k \cdot a_k = \sum h_k \cdot a_k \quad \text{Formel 5-4}$$

mit den Parametergrößen:

μ	Erwartungswert
n	Gesamtschlagzahl
n_k	Absolute Häufigkeit
h_k	Relative Häufigkeit
a_k	Mittelpunkt Schlagintensitätsklasse

Der Erwartungswert μ ist die Summe des Produktes zwischen der relativen Häufigkeit h_k und des jeweiligen Mittelpunkts der Schlagintensitätsklasse a_k . Die relative Häufigkeit entspricht dabei der absoluten Häufigkeit, bezogen auf die Gesamtschlagzahl. Die Standardabweichung ist als die Quadratwurzel der Varianz σ^2 definiert. Diese ist, wie bereits erwähnt, ein Maß für die Streuung der Werte um den Erwartungswert herum und ist wie folgt definiert:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum n_k \cdot (a_k - \mu)^2 = \sum h_k \cdot (a_k - \mu)^2 \quad \text{Formel 5-5}$$

Die Standardabweichung σ beschreibt zusammen mit dem Erwartungswert vollständig die Normalverteilung gemäß der Dichtefunktion in Formel 5-3. In Abbildung 29 links ist zusätzlich der Maximalwert beziehungsweise die Beanspruchungsamplitude eingezeichnet. Hierbei handelt es sich um einen weiteren charakteristischen Wert, der in Abschnitt 5.3.2 bei der Aufstellung des Beanspruchungsmodells benötigt wird.

Der Beanspruchungszustand kann durch die Ermittlung dieser charakteristischen Größe aus den Versuchsdaten beschrieben werden. Das Ziel der nachfolgenden Untersuchungen in Abschnitt 5.3 ist die Ermittlung des Einflusses der Untersuchungsparameter auf den Beanspruchungszustand des Rohrs. Da das Modell basierend auf den Messdaten aufgestellt wird, kann gleichzeitig die Beanspruchung des Rohrs durch die Normalverteilungsparameter Standardabweichung, Erwartungswert und Beanspruchungsamplitude quantifiziert werden. Es ist dabei notwendig, dass die Versuchswerte normalverteilt sind. Daher werden bei der Analyse der Datenwerte jeweils eine grafische und eine rechnerische Überprüfung anhand des QQ-Plots sowie anhand der AD-Teststatistik auf Normalverteilung durchgeführt. Die Modellbildung der Beanspruchung auf Basis der Normalverteilung erfolgt in Abschnitt 5.3.2. Nachfolgend wird zunächst auf die gemessenen Schlagintensitäten eingegangen.

5.2.2 Ermittlung der Schlaganfangsbedingungen und Gesamtverlust

Beim Schlagverfahren werden Schlagimpulse auf die Ablagerungsoberfläche eingebracht und infolgedessen der Abtrag realisiert. Die kinetische Energie des Werkzeugs beim Aufprall legt die Höhe des übertragenen Impulses fest. Dieser ist definiert als das Produkt der Aufschlagmasse und der Aufschlaggeschwindigkeit. Aus der Wirkung des Schlages, der an der Rohraußenfläche gemessen wird, kann auf einen äquivalenten Schlagimpuls geschlossen werden. Zwischen der

Wirkung und der Ursache des Schlages existiert eine Korrelation, die im Folgenden näher erläutert werden soll. Ein großer Teil der kinetischen Energie des Werkzeugs wird beim Schlag in elastische Energie umgewandelt, deren Wirkung durch den Kraftverlauf an der Rohraußenwand erfasst wird. Ein weiterer Teil der kinetischen Energie geht über in Verluste in Form von Reibungen und Verformungen, die an der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Rohrrinnenwand auftreten. Zudem treten, wie im vorherigen Abschnitt dargelegt, Energieverluste durch Reibungen in den Wirkflächen zwischen dem Rohr und den Sensoren auf, was sich in der Form von Seitenkräften zeigt. Die Erfassung dieser Energieanteile, die nicht zum Schlag beitragen, ist aufgrund ihres Auftretens in Kontaktflächen schwierig durchführbar. Hingegen kann die Höhe des Gesamtverlustes beim Schlag für unterschiedliche Intensitäten durch einen Vergleich der kinetischen Anfangsenergie des Werkzeugs mit der eingebrachten Schlagenergie im Rohr abgeschätzt werden. Die theoretisch mögliche Energie beim Aufprall kann, in Abhängigkeit der Frequenz, mithilfe der Bewegungsgleichung berechnet werden. Bei der dabei angenommenen Auftreffgeschwindigkeit handelt es sich um den tatsächlichen Wert, der in Abschnitt 4.3.1 validiert worden ist. Gleichzeitig kann der im Rohr eingebrachte Anteil der Schlagenergie durch die Messung des Schlagkraftverlaufs ermittelt werden. Daraus lässt sich in Abhängigkeit der Schlagenergie eine korrespondierende Auftreffgeschwindigkeit herleiten. Bei dieser Geschwindigkeit handelt es sich um einen theoretischen Wert, der nur dann angenommen werden kann, wenn der Schlag komplett verlustfrei erfolgen würde. Durch den Vergleich der beiden Geschwindigkeitsanteile – korrespondierende und tatsächliche Auftreffgeschwindigkeit – kann somit der Anteil der Verlustenergie für einen beliebigen Schlag ermittelt werden. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Verluste ist grafisch in der nachfolgenden Abbildung 30 dargestellt.

Im nachfolgenden Abschnitt wird zunächst vorgestellt, wie aus der gemessenen Schlagwirkung eine zugehörige theoretische beziehungsweise korrespondierende Auftreffgeschwindigkeit ermittelt werden kann. Aus dem Vergleich dieser Auftreffgeschwindigkeit mit der tatsächlichen Auftreffgeschwindigkeit (Abschnitt 5.2.2.3) des Werkzeugs soll dann der Gesamtverlust bei einem Schlag ermittelt werden. Zudem wird nachfolgend auch der Verlust an Energie durch das Auftreten der Seitenkraft und den Reibungseffekten bestimmt. Ziel dieses Abschnitts ist es aufzuzeigen, dass aus dem gemessenen Beanspruchungszustand die Schlaganfangsbedingungen abgeleitet werden können. Damit ist dann möglich, die Höhe der Beanspruchung in Form einer Aufprallenergie und eines Impulses anhand des Beanspruchungsmodells zu bestimmen. Dadurch kann dann beispielsweise im Rahmen einer

theoretischen Betrachtung durch eine FEM-Simulation das Abtragverhalten beim Schlag näher untersucht werden.

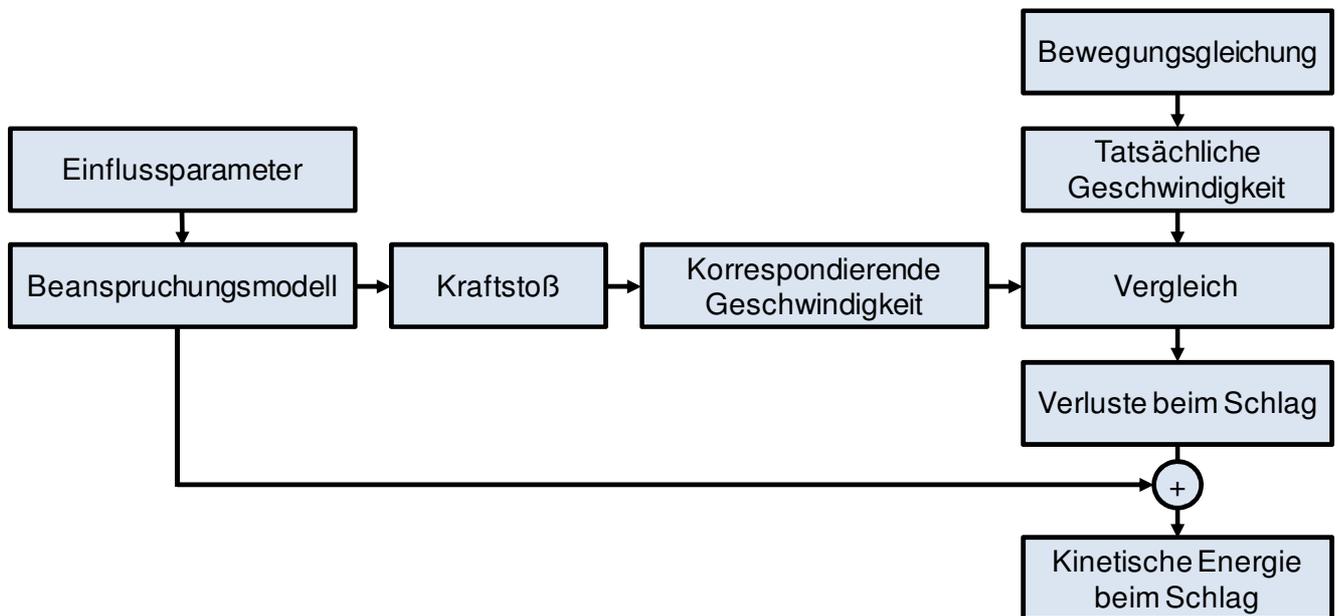


Abbildung 30: Vorgehensweise zur Ermittlung der kinetischen Energie des Werkzeugträgers beim Einschlag

5.2.2.1 Schlagkraft und korrespondierende Geschwindigkeit

Beim Schlag des Werkzeugs auf die Rohrrinnenfläche kommt es zum Kraffteintrag infolge der erzeugten Dehnungen und Spannungen an der Kontaktstelle. Der Verlauf und die Intensität dieser Kraft hängen von der einschlagenden Masse sowie von der Abbremsbeschleunigung des Werkzeugs ab. Dabei wird die kinetische Energie des Werkzeugs in Form eines Impulses an die Rohrrinnenwand übertragen. Die nachfolgende Abbildung 31 zeigt einen Kraftverlauf beim Schlag an, der auf der Rohraußenwand durch die Scherkraftsensoren des Versuchstandes gemessen worden ist. Der Kraftverlauf zeigt die typischen Charakteristika eines elastischen Schlags an. Er besteht aus einer Anstiegsphase, der sogenannten Kompressionsperiode, sowie aus einem anschließend folgenden Kraftabfall, der sogenannten Restitutionsperiode. Die Zeit, in der das Werkzeug in Interaktion mit der Rohrrinnenwand steht, ist die Schlagzeit t_s . Während dieser Zeit wird das Werkzeug komplett abgebremst und erfährt beim Kraftmaximum eine Geschwindigkeitsumkehr. In der Restitutionsperiode wird das Werkzeug durch die gespeicherte elastische Energie der Rohrrinnenwand bis zur Stoßzeit t_s beschleunigt und verlässt dann die Kontaktstelle. Die entgegen der Schlagrichtung wirkende Beschleunigung des Werkzeugs aufgrund der elastischen Energie des Schlagkörpers ist auch als Rückprall bekannt.

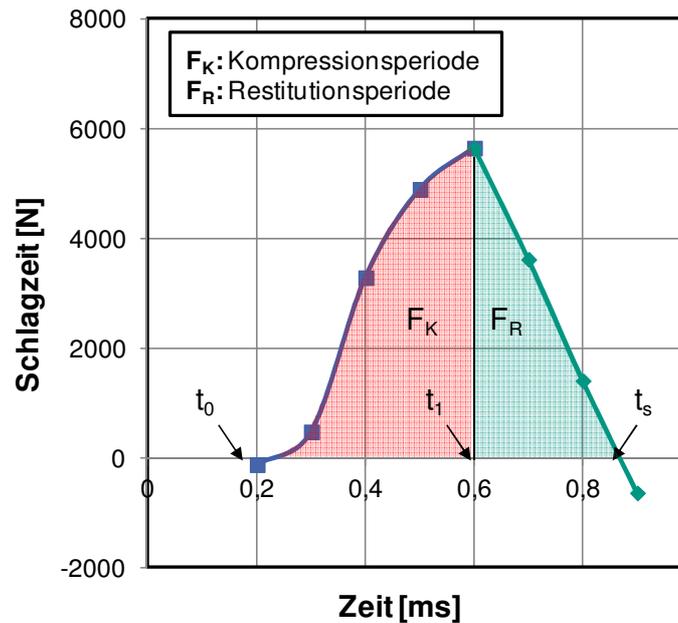


Abbildung 31: Kraftverlauf beim Einschlag des Werkzeugs auf die Rohraußenwand, gemessen an der Rohraußenwand

Die Fläche unter dem Kraftverlauf ergibt die Schlagkraft F_S . Diese setzt sich nach [Gro-09] aus den beiden Kraftkomponenten F_{KS} und F_{RS} zusammen und kann anhand der nachfolgenden Formel 5-6 berechnet werden.

$$F_S = \int_{t_0}^{t_s} F(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} F(t) dt + \int_{t_1}^{t_s} F(t) dt = F_{KS} + F_{RS} \quad \text{Formel 5-6}$$

mit den Parametergrößen:

- F_S Schlagkraft
- $F(t)$ Kraftverlauf beim Schlag
- F_{KS} Kraftstoß Kompressionsperiode
- F_{RS} Kraftstoß Restitutionsperiode

Unter Vernachlässigung von plastischen Verformungen und Reibungen kann der Kraftbeziehungsweise Spannungsanstieg/-abfall des Kraftverlaufs durch die elastischen Eigenschaften des Materials erklärt werden. Dies ist besonders in der Restitutionsperiode zu beobachten. In dem gezeigten Beispiel ist der Kraftabfall linear und die plastischen Verformungen im Material sind vernachlässigbar. Im Vergleich dazu treten beim Kraftanstieg in der Kompressionsperiode irreversible Verformungen auf, sodass dort ein degressiver Verlauf zu erkennen ist. Die Größe der irreversiblen Verformungen und Reibungseinflüsse kann beim Schlag durch die Verhältnisse der beiden Kraftkomponenten F_{RS} zu F_{KS} , durch die sogenannte

Stoßzahl j , ermittelt werden. Im oberen Beispiel handelt es sich bei einer Stoßzahl von $j = 0,6$ ($F_{RS} = 0,71 \text{ Ns}$ und $F_{KS} = 1,13 \text{ Ns}$) um einen teilelastischen Schlag.

Durch die Kenntnis der Schlagkraft kann eine korrespondierende Auftreffgeschwindigkeit, bei bekannter Schlagmasse, bestimmt werden. Hierzu wird aus der Kompressionsperiode gemäß der Formel 5-6 die Aufprallgeschwindigkeit des Werkzeugs ermittelt. Das Integral des Kraftverlaufs bis zum Kraftmaximum entspricht dem Impuls des Werkzeugs kurz vor dem Schlag.

$$F_{KS} = \int_{t_0}^{t_1} F(t) dt = m \cdot \int_{t_0}^{t_1} v dt = m \cdot (v(t_0) - v(t_1)) = m \cdot v(t_0) \quad \text{Formel 5-7}$$

mit den Parametergrößen:

$v(t)$	Geschwindigkeit der Schlagmasse während des Schlages
$v(t_0)$	Geschwindigkeit der Schlagmasse unmittelbar vor dem Einschlag
$v(t_1)$	Geschwindigkeit der Schlagmasse bei Kraftmaximum $v(t_1) = 0 \text{ m/s}$
m	Einschlagmasse

Aus der Messung des Kraftverlaufs des Schlages und der Kenntnis der Werkzeugmassen kann mithilfe der Formel 5-7 die korrespondierende Geschwindigkeit beim Aufschlag des Werkzeugs zum Zeitpunkt t_0 berechnet werden. Etwaige Verluste sind zunächst nicht berücksichtigt und werden im Abschnitt 5.2.2.4, gemäß der in Abbildung 30 dargestellten Vorgehensweise ermittelt. Die tatsächliche Auftreffgeschwindigkeit ist um den Anteil dieser Verluste größer. Der gemessene Kraftverlauf entspricht, da die Schlagmasse konstant bleibt, dem Verlauf der Geschwindigkeit des Werkzeugs während des Schlages. Die Schlagzeit, die während der experimentellen Untersuchungen gemessen worden ist, liegt in der Größenordnung unter einer Millisekunde. Entsprechend treten hohe Beschleunigungen und Schlagkraftmaxima auf. Beispielsweise wurde bei der Normierung der Schlagintensitäten in Abschnitt 5.2.1 ein Schlagkraftmaximum von 7.500 N bei maximaler Werkzeugträgerfrequenz angenommen.

Die aus dem Kraftverlauf ermittelte Anfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs ist eine theoretische Geschwindigkeit unter der Annahme, dass ein rein elastischer Schlag vorliegt und mögliche Energieverluste bei einem Schlag vernachlässigt werden können. Wie bereits erwähnt, kann die genaue Höhe der Verluste nicht direkt gemessen werden. Es wird nachfolgend gezeigt, dass eine Schätzung über die auftretenden Verluste möglich ist. Hierzu wird ein Vergleich der tatsächlichen Aufschlaggeschwindigkeit des Werkzeugs aus der Bewegungsgleichung mit der theoretischen beziehungsweise korrespondierenden Geschwindigkeit aus der Messung der Beanspruchung durchgeführt.

Nachfolgend wird zunächst auf den Anteil des Verlustes eingegangen, der an den Flächen der anliegenden Sensoren in Form der Seitenkraft auftritt.

5.2.2.2 Ermittlung des Seitenkraftanteils der Schlagkraft

Um die Schlagkraft auf die Ablagerungen zu übertragen, ist eine passende Einspannvorrichtung notwendig, die das Rohr in Position hält und die Schlagkraft aufnimmt. Beim Schlag kommt es jedoch ungewollt zur Reibung zwischen der Einspannstelle und dem Rohr. Die auftretende Reibung stellt einen Verlust der Schlagkraft dar. Die Höhe dieses Verlustes hängt sehr stark von der Ausführung der Einspannvorrichtung ab. Beim Versuchsstand in Abbildung 25 wurde die Einspannung des Rohrs durch das Anlegen von vier Scherkraftsensoren an der Rohraußenwand realisiert. Bei dieser Ausführung zeigen sich die Verluste in der Einspannung durch das Auftreten einer Seitenkraft, wie sie in Abbildung 26 dargestellt ist. Die Seitenkraft tritt jeweils senkrecht in Messrichtung der Sensoren auf und kann mit einem einaxialen Scherkraftsensor des Versuchsstandes nicht gleichzeitig mit dem Schlag gemessen werden. Um die Höhe der Seitenkraft zu messen, wurde in einem Versuch einer der beiden seitlichen Scherkraftsensoren durch einen quer zur Schlagrichtung messenden Sensor ersetzt. Hierzu wurde ein in den Abmessungen gleicher Metallstab mit Dehnmessstreifen zur Messung der Seitenkraft eingesetzt. Durch den gegenüberliegenden Sensor konnte zudem die korrekte Höhe der Vorspannkraft eingestellt werden. Zunächst wurde der Sensor kalibriert und anschließend Schlagversuche durchgeführt, um die Höhe der Seitenkraft zu ermitteln. Aufgrund der Symmetrie des Versuchsstandes wurde angenommen, dass die Seitenkraft am gegenüberliegenden Sensor gleich groß ausfällt. Die Schlagversuche wurden mit einem Pendelhammer der Länge 412 mm und den Schlagmassen 0,4 kg und 0,8 kg durchgeführt. Dabei erfolgt der Schlag auf den Werkzeugträger, sodass der Impuls auf das an der Rohrrinnenwand anliegende Werkzeug übertragen werden konnte. Zur Verifizierung der Ergebnisse wurden jeweils neun Versuche durchgeführt. In Anhang 2 sind die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen aufgeführt. Ziel der Untersuchung war die Ermittlung der Höhe der Seitenkraft bezogen auf das gemessene Schlagkraftmaximum, um daraus den Anteil des Verlustes aufgrund der Seitenkraft abzuschätzen. In der folgenden Abbildung 32 sind der Mittelwert des Schlagkraftverlaufs sowie der Mittelwert der Seitenkraft für die zwei unterschiedlichen Schlagintensitäten dargestellt. Im Vergleich zur Schlagkraft ist der Seitenkraftanteil deutlich kleiner. Zudem tritt die Seitenkraft trotz der gleichzeitigen Messung leicht verschoben auf. Die Beobachtungen können auf Basis des coulombschen Reibungsgesetzes erklärt werden. Die zu Beginn des Schlages anwachsende Seitenkraft ist ein Indiz dafür, dass die Grenze zur Gleitreibung nicht überwunden ist und dass die Haftreibung vorherrscht. Diese wird vor dem Erreichen des Schlagmaximums kurzfristig

überwunden. Die Seitenkraft nimmt daraufhin bereits vor dem Erreichen des Schlagkraftmaximums wieder ab und führt zu einem wiederholten Übergang in die Haftreibung. In der Restitutionsperiode wird der Zustand der Haftreibung beibehalten. Wie die Messung aufzeigt, tritt die Seitenkraft vorwiegend in der Kompressionsperiode auf und kann in der Restitutionsperiode vernachlässigt werden.

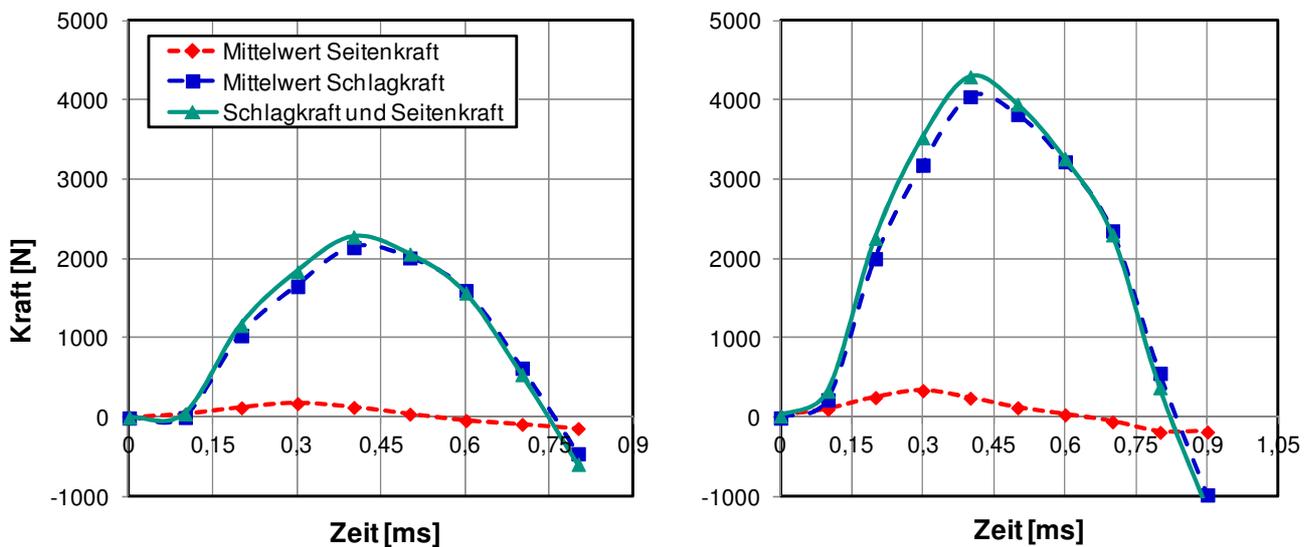


Abbildung 32: Verlauf der Kräfte beim Aufschlag einer Masse von 0,4 kg (links) und bei einer Masse von 0,8 kg (rechts)

Das Verhältnis des Seitenkraftmaximums und der Vorspannung ergibt einen Wert von 9,2 %, bei einer Schlagmasse von 0,8 kg. Beim Schlag mit einer Masse von 0,4 kg ist das Verhältnis auf fast die Hälfte, circa 4,9 %, reduziert. Es zeigt sich damit, dass die Höhe der Seitenkraft von der Schlagintensität abhängt und eine proportionale Beziehung zwischen der Seitenkraft und dem Schlagkraftmaximum angenommen werden kann. Entsprechend ist das Verhältnis der Seitenkraft zum Zeitpunkt des Schlagmaximums, bezogen auf das Schlagmaximum in beiden Fällen, im Mittel annähernd 12,4 %. Demnach wird circa 12,4 % der ursprünglichen Schlagenergie in Seitenkraft umgewandelt. Dieser Anteil trägt zum Gesamtverlust der kinetischen Energie beim Schlag bei. Die Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe sollen lediglich die ungefähre Höhe der Verluste durch Seitenkräfte im Versuchsstand aufzeigen. Bei der Bestimmung des Gesamtverlusts in Abschnitt 5.2.2.4 ist der Seitenkraftverlust bereits berücksichtigt. Für den weiteren Verlauf der Arbeit ist daher die genaue Höhe der auftretenden Seitenkräfte nicht relevant.

Zur Bestimmung des Gesamtverlustes beim Schlag wird nachfolgend die tatsächliche Auftreffgeschwindigkeit des Werkzeugs mithilfe der Bewegungsgleichung des Werkzeugträgers

ermittelt. Anschließend soll mithilfe eines Soll-Ist-Vergleichs der Geschwindigkeiten der Anteil am Gesamtverlust bestimmt werden.

5.2.2.3 Tatsächliche Geschwindigkeit beim Aufprall

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der tatsächlichen Geschwindigkeit beim Aufschlag des Werkzeugs wurde bereits in Abschnitt 4.3.1 anhand der Bewegungsgleichung des Werkzeugträgers erläutert. Unter Berücksichtigung der Werkzeugmasse kann die Aufprallgeschwindigkeit des Werkzeugs im Rohr anhand der Formel 4-3 berechnet werden (Anhang 3). Die Ergebnisse der Messungen sind in der nachfolgenden Abbildung 33 dargestellt. Zusätzlich wurden in den Messungen die Beschleunigung des Werkzeugträgers mit befestigtem Werkzeug durchgeführt und im gleichen Diagramm vergleichend gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten aus der Bewegungsgleichung. Es ist daher zulässig, die Bewegungsgleichung für die Ermittlung der Geschwindigkeit heranzuziehen. Durch die Integration der Beschleunigung, die durch die Bewegungsgleichung wiedergegeben wird, kann die am Werkzeugträger tatsächlich anliegende Geschwindigkeit berechnet werden. Diese Geschwindigkeit stellt die Auftreffgeschwindigkeit des Werkzeugs kurz vor dem Aufprall auf die Rohreninnenfläche dar. Der Verlauf der Geschwindigkeit über der Frequenz verhält sich linear.

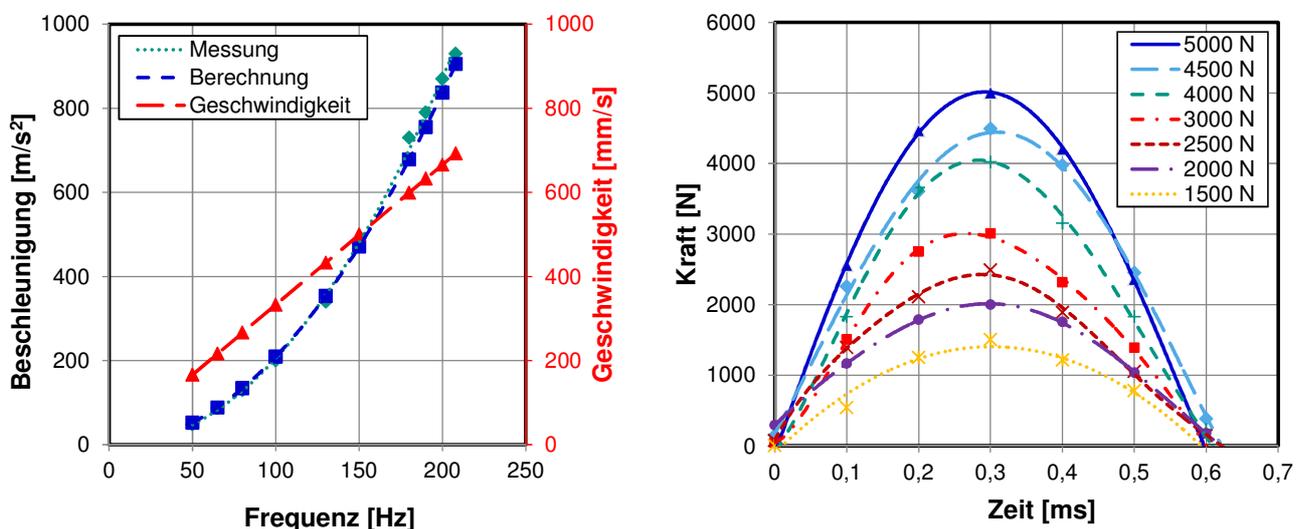


Abbildung 33: Verlauf der Beschleunigung und der Geschwindigkeit für verschiedene Frequenzen (links) sowie Mittelwerte von Kraftverläufen unterschiedlicher Schlagintensitäten (rechts)

Mit diesem Verlauf der tatsächlichen Geschwindigkeit und der bekannten Schlagmasse kann die kinetische Energie beim Schlag bestimmt werden. Zur Abschätzung des Gesamtverlustes wird die tatsächliche kinetische Energie der korrespondierenden Energie gegenübergestellt. Da die

Masse in beiden Fällen konstant ist, ist dabei der Vergleich der jeweiligen Geschwindigkeitskomponenten ausreichend, um den Verlustanteil zu bestimmen. Nachfolgend wird die korrespondierende Geschwindigkeit aus der Beanspruchung ermittelt und daraus dann der Gesamtverlust bestimmt.

5.2.2.4 Korrespondierende Geschwindigkeit beim Aufprall und Gesamtverlust

Die Ermittlung der korrespondierenden Geschwindigkeit des Werkzeugs erfolgt anhand der Messungen des Kraftverlaufs beim Schlag. Nachfolgend wird aufgezeigt, dass die Informationen aus dem Kraftverlauf einen Rückschluss auf eine theoretische beziehungsweise auf die korrespondierende Geschwindigkeit zulassen. Hierzu muss zunächst aus der Beanspruchung des Rohrs ein repräsentativer Kraftverlauf ausgewählt werden. Geeignet dafür ist der Kraftverlauf, bei dem ein Maximum der Schlaghäufigkeit im Schlagbild vorliegt. Dieser Wert entspricht laut Abbildung 29 links dem Mittelwert μ des Beanspruchungsverlaufs. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse werden bei der Auswertung jeweils fünf Kraftverläufe gleicher Intensität aus der Beanspruchung ausgesucht und daraus der Mittelwert des Kraftverlaufs gebildet. Anschließend wird für die einzelnen Kraftverläufe der Kraftstoß in der Kompressionsperiode bestimmt. Über die bekannte Schlagmasse des Werkzeugträgers kann dann anhand der Formel 5-7 die theoretische Aufprallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Frequenz der betrachteten Beanspruchung bestimmt werden. Zum Schluss erfolgt der Vergleich der theoretischen Geschwindigkeit mit der tatsächlichen Geschwindigkeit, indem das Verhältnis der beiden Größen gebildet wird. Dies stellt ein Maß für den Gesamtverlust der kinetischen Energie beim Schlag dar.

Die Ermittlung des Verlustes wurde für verschiedene kinetische Energien des Werkzeugträgers durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein Kraftstoß aus dem Flächenintegral von jeweils fünf Kraftverläufen ähnlicher Intensitäten gebildet. Abbildung 33 rechts zeigt die Mittelwerte der unterschiedlichen Schlagintensitäten. Auffallend dabei ist, dass die jeweilige Schlagzeit bei circa 0,6 ms liegt und damit unabhängig von der Kraftintensität ist. In der nachfolgenden Tabelle 14 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen, dass für jeweils unterschiedliche Frequenzen ein ähnlich hoher Verlustanteil auftritt. Bei hoher Geschwindigkeit ist der Kraftstoß entsprechend größer, der Anteil der Verluste ist dabei gleich groß und liegt im Mittel bei circa 32 %, inklusive der Verluste aufgrund der Seitenkraft. Damit kann mithilfe der Kenntnis über die Verluste für jede Kraftintensität aus der Beanspruchung die tatsächliche kinetische Energie beim Aufschlag des Werkzeugs angegeben werden.

Tabelle 14: Bestimmung des Verlustanteils für unterschiedliche Schlagintensitäten

Kraftmaximum	[N]	2000	2500	3000	4000	4500	5000
Frequenz	[Hz]	76,2	95,25	114,3	152,4	171,45	190,5
Tatsächliche Geschwindigkeit	[mm/s]	253	317	380	507	570	634
Kraftstoß	[N/s]	0,380	0,485	0,574	0,75	0,803	0,957
Korresp. Geschwindigkeit	[m/s]	173	221	261	343	366	436
Gesamtverlust	[%]	32	30	31	32	36	31

Wie die Ergebnisse in diesem Abschnitt gezeigt haben, kann aufgrund der proportionalen Beziehung zwischen dem Kraftverlauf eines Schlages und der tatsächlichen Aufschlaggeschwindigkeit die kinetische Energie des Werkzeugs aus der Beanspruchung berechnet werden. Bei Kenntnis der Beanspruchung kann daher auf die Schlaganfangsbedingungen zurückgeschlossen werden. Im nächsten Abschnitt wird die Beanspruchung des Rohrs in Abhängigkeit der Einflussfaktoren erfasst und am Ende in einem Gesamtmodell zur Erklärung der Beanspruchung zusammengefasst. Daraus kann, wie im Rahmen dieses Abschnittes gezeigt worden ist, relativ einfach auf die kinetische Anfangsenergie geschlossen werden.

5.3 Experimentelle Untersuchungen und Modellbildung

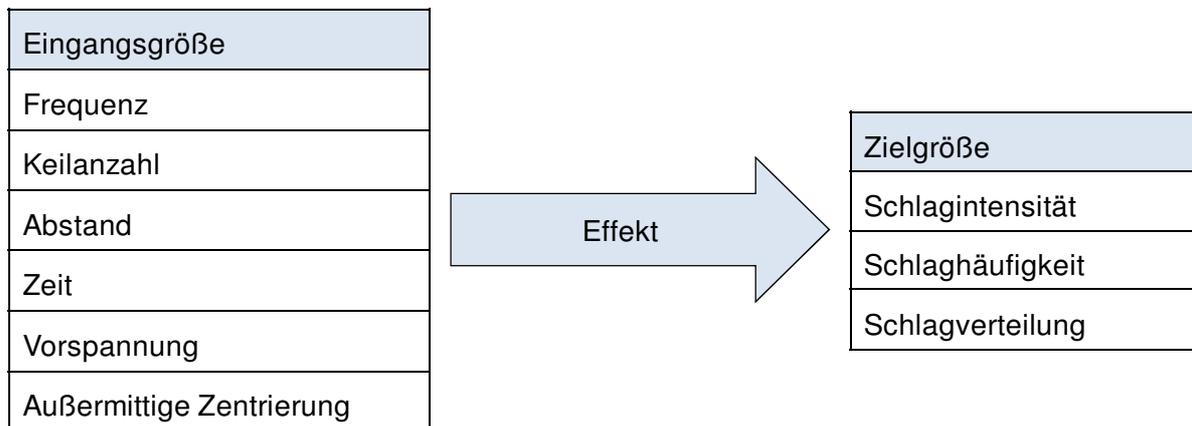


Abbildung 34: Untersuchungsgrößen für die Aufstellung des Beanspruchungsmodells

Nachdem die Vorgehensweise zur Aufstellung des Beanspruchungsmodells geklärt wurde, werden in diesem Abschnitt die Wirkungen der Einflussfaktoren auf die Beanspruchung im Rohr erfasst. Hierzu werden gemäß dem Versuchsplan aus Abschnitt 5.1 jeweils einzelne Parameter in dem Versuchsstand untersucht und die Wirkungen auf das Schlagbild in der Rohrwand beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse im nächsten Abschnitt 5.3.2 mathematisch

beschrieben und schrittweise zu einem Gesamtmodell zusammengeführt. Am Ende dieses Abschnitts wird ein Beanspruchungsmodell vorgestellt, das den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die Beanspruchung der Rohinnenwand beschreiben kann. In Abbildung 34 ist ein Überblick über den Untersuchungsablauf dargestellt. Ziel ist die Ermittlung der Wirkungen der Einflussgrößen auf die drei charakteristischen Größen Schlagintensität, Schlagrichtung und Schlaghäufigkeit.

5.3.1 Erfassung von Wirkungen der Einflussfaktoren

Im Folgenden werden zunächst die einzelnen Wirkungen der Einflussfaktoren (univariat) untersucht, indem jeweils ein Einflussfaktor variiert wird, während alle weiteren Einflussfaktoren konstant gehalten werden. Danach wird eine mögliche Wechselwirkung mit anderen Faktoren überprüft. Hierzu werden bei Bedarf zwei Faktoren auf unterschiedlichen Niveaus variiert und daraus der Effekt ermittelt. Der Effekt eines Faktors ist die Differenz der Mittelwerte der Einflüsse eines Faktors auf niedriger Stufe und der Mittelwerte der Einflüsse des Faktors auf hoher Stufe. Die Bestimmung des Effektes ist in Abbildung 35 grafisch verdeutlicht und kann anhand dieses einfachen Beispiels gemäß Klein [Kle-07] wie folgt berechnet werden:

$$\text{Effekt Faktor A: } \frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_4}{2} - \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_3}{2}$$

$$\text{Effekt Faktor B: } \frac{\bar{y}_3 + \bar{y}_4}{2} - \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2}{2}$$

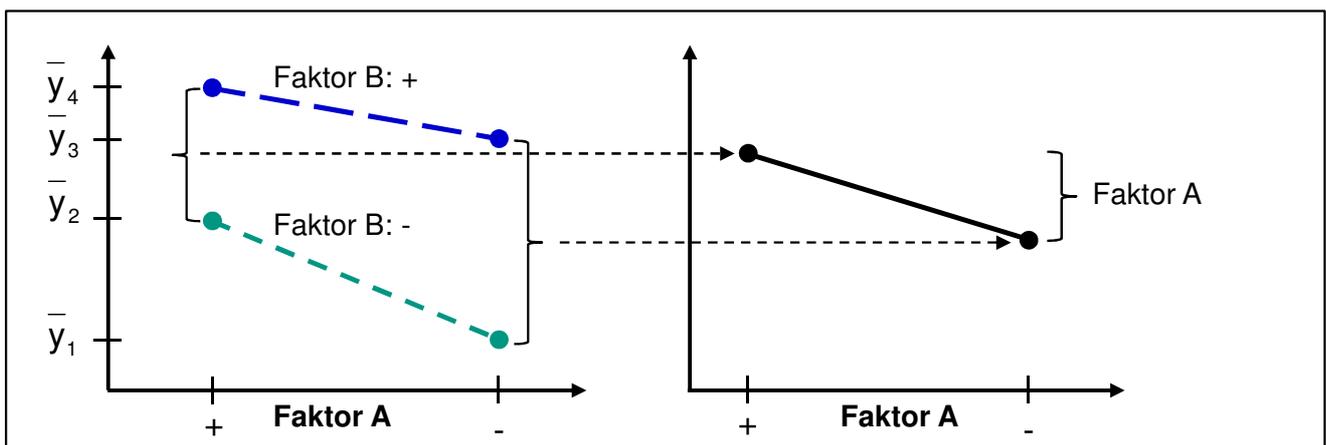


Abbildung 35: Berechnung des Effektes einer Einflussgröße auf zwei Stufen [Kle-08]

Anhand der Untersuchung eines Faktors auf unterschiedlichen Niveaus kann eine Wechselwirkung einfach erkannt werden. Liegen die beiden Geraden parallel zueinander, so liegt keine Wechselwirkung zwischen den Faktoren vor. Entsprechend nimmt mit abfallender

Parallelität der Einfluss der Wechselwirkung zu. Eine starke Wechselwirkung liegt bei sich kreuzenden Geraden vor. Nach der statistischen Erfassung der Wirkungen und des Effektes erfolgt die Beschreibung mithilfe einer Regressionsanalyse. Zum Abschluss werden die Einzelfaktoren miteinander verknüpft und das Beanspruchungsmodell für die Rohrrinnenwand hergeleitet.

5.3.1.1 Bestimmung der Wirkung der Frequenz

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren aus der Einflussmatrix ist die Frequenz des Werkzeugträgers. Zur Untersuchung der Wirkung dieser Größe auf die Beanspruchung wurde die Frequenz gemäß Tabelle 10 bis 210 Hz variiert. Die Untersuchungen wurden an einem Vier-Kantenwerkzeug durchgeführt. Für jeden Keil wurde das Schlagbild durch einen der vier Sensoren erfasst und anschließend der Beanspruchungsverlauf gemäß Abschnitt 5.2.1 hergeleitet. Nachfolgend werden jeweils die Mittelwerte der aufgezeichneten Beanspruchung vorgestellt. Alle Untersuchungen wurden, wenn nicht anders erwähnt, an einem Rohr mit einem Innendurchmesser von $D_1 = 62$ mm durchgeführt (Rohr 3 aus Tabelle 12).

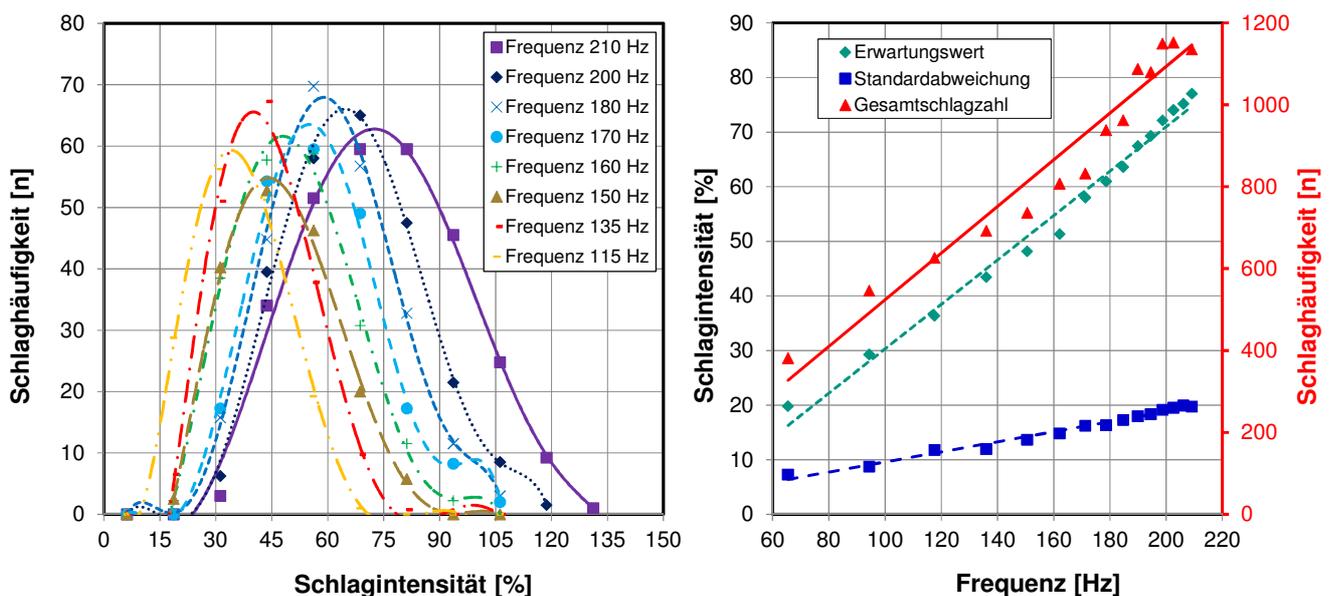


Abbildung 36: Schlagbild bei unterschiedlichen Frequenzen (links) und Einfluss der Frequenz auf Erwartungswert, Standardabweichung und Gesamtschlagzahl (rechts)

Die Ergebnisse der Untersuchung sind grafisch in Abbildung 36 dargestellt. Sie zeigen zunächst eine Normalverteilung des Schlagbildes für jede Frequenz, das die Schlaghäufigkeit über die Schlagintensität angibt. Dabei bedeuten 100 % Schlagintensität eine Schlagkraft von 7.500 N. Außerdem ist zu erkennen, dass die Vergrößerung der Frequenz zu einer Erhöhung der

Schlagintensitäten führt. Infolgedessen ist das Schlagbild mit größer werdender Frequenz in Richtung höhere Intensitäten verschoben.

Wie bereits erwähnt, kann das Schlagbild durch die drei Größen Erwartungswert, Standardabweichung sowie Maximalwert beziehungsweise Beanspruchungsamplitude beschrieben werden. Die Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 36 rechts, zeigen einen linearen Einfluss der Frequenz auf den Erwartungswert und die Standardabweichung der Beanspruchung an. Anhand der Bewegungsgleichung kann die Ursache des linearen Einflusses erklärt werden. Es liegt gemäß der Formel 4-3 ein quadratischer Einfluss der Frequenz auf die Beschleunigung des Werkzeugs vor. Entsprechend ist der Einfluss auf die Geschwindigkeit des Werkzeugträgers linear. Die Geschwindigkeit wiederum besitzt einen linearen Einfluss auf die Änderung des Schlagimpulses beziehungsweise der Schlagintensität gemäß der Formel 5-7. Entsprechend hat die Frequenz einen linearen Einfluss auf die Geschwindigkeit beim Einschlag und damit auf die Schlagintensität.

Nach der Übertragung des Impulses auf die Rohrrinnenfläche wird das Werkzeug durch die Drehung der Unwucht kontinuierlich weiter beschleunigt. In Abhängigkeit der Richtung und der Höhe des Rückpralls kommt es zu einer Überlagerung beider Beschleunigungsanteile, die zu einer resultierenden Geschwindigkeit beim nächsten Einschlag führen. Je nach Richtung dieser beiden Komponenten kann die resultierende Beschleunigung kleiner oder größer als die eigentliche Beschleunigung aufgrund der Drehung der Unwucht ausfallen. Da keine bestimmte Reihenfolge des Schlageintrags durch die Werkzeugkanten vorliegt, herrscht beim Einschlag immer eine andere Ausgangssituation, obwohl die Frequenz des Werkzeugträgers jeweils gleich groß ist. Anhand des Verlaufs des Schlagbildes in Abbildung 36 links ist dies deutlich zu erkennen. Für jede beliebige Frequenz existieren verschiedene Schlagintensitäten unterschiedlicher Häufigkeiten. Das Maß für die Unterschiedlichkeit der Schlagintensitäten ist die Größe der Standardabweichung σ . Die Veränderung der Frequenz zeigt anhand der Abbildung 36 rechts, dass auch auf diese Einflussgröße ein linearer Einfluss vorliegt. Die Unterschiedlichkeit der Schlagintensitäten nimmt linear zu. Die Ursache hierfür liegt an der höheren Dynamik im Rohr aufgrund steigender Frequenz. Entsprechend nimmt die Werkzeugbeschleunigung zu und damit auch die Kontakthäufigkeit des Werkzeugs mit der Rohrrinnenwand. Anhand der Gesamtschlagzahl, dargestellt im selben Diagramm, ist dies gut zu erkennen. Die lineare Zunahme der Schlagintensität ist damit die Ursache der linearen Zunahme der Gesamtschlagzahl. Des Weiteren haben die Untersuchungen gezeigt, dass die Beanspruchungsamplitude im Rahmen dieser Versuchsreihe annähernd konstant bleibt.

Zusammengefasst haben diese Ergebnisse aufgezeigt, dass die Frequenz maßgeblich die Dynamik des Werkzeugs im Rohr beeinflusst. Es liegt sowohl bei der Standardabweichung als auch bei der Gesamtschlagzahl und der Schlagintensität ein linearer Einfluss vor. Die genaue Erfassung der Höhe des Effektes, basierend auf diesen Ergebnissen, wird in Abschnitt 5.3.2 durchgeführt und dort in das Gesamtmodell aufgenommen.

5.3.1.2 Bestimmung des Einflusses der Beanspruchungszeit

Zur Untersuchung der Wirkung des Vorschubs wurde gemäß Tabelle 11 die Beanspruchungszeit variiert. Dies ist die Zeitdauer bei der ein bestimmter Rohrquerschnitt durch das Werkzeug beansprucht wird. Sie entspricht damit der Verweildauer des Werkzeugs in dem betrachteten Rohrabschnitt. Nachfolgend wurde die zu dem Vorschub äquivalente Größe der Verweilzeit untersucht. Gemäß Tabelle 11 wurden Verweilzeiten von 5 s, 10 s, 20 s, 30 s und 40 s untersucht. Bei einer Werkzeuglänge von 50 mm entspricht diese einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s, 5 mm/s, 2,5 mm/s, 1,67 mm/s sowie 1,25 mm/s. Bei der Versuchsdurchführung wurden sowohl das Rohrstück als auch das Werkzeug relativ zueinander in Position gehalten, sodass der Beanspruchungszustand in dem betrachteten Rohrquerschnitt untersucht werden konnte. Zur Erfassung des Effektes wurden die Untersuchungen für jeweils drei Frequenzen (150 Hz, 180 Hz und 190 Hz) durchgeführt.

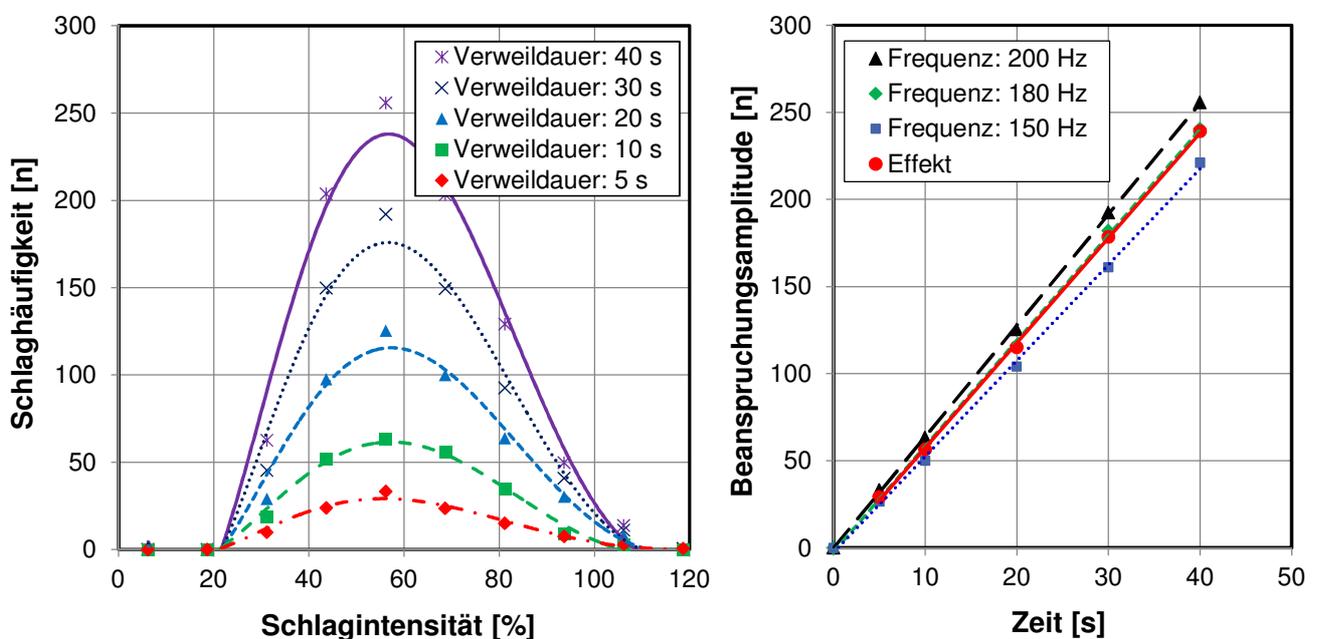


Abbildung 37: Einfluss der Zeit auf die Beanspruchung bei der Frequenz von 190 Hz (links) und Verlauf der Beanspruchungsamplitude für unterschiedliche Frequenzen (rechts)

In Abbildung 37 links ist das Schlagbild für unterschiedliche Verweilzeiten und der Frequenz 190 Hz dargestellt. Bei den in Anhang 5 aufgeführten Messwerten der Frequenzen 150 und 180 Hz wurden ähnliche Ergebnisse gemessen. Mit zunehmender Verweilzeit im Rohrquerschnitt nimmt der Beanspruchungszustand zu. Dabei bleiben der Erwartungswert sowie die Standardabweichung jeweils konstant. Die Schlaghäufigkeiten der jeweiligen Schlagklassen nimmt dagegen mit der Zeitdauer zu. Zur Erfassung des Effektes auf die Größe Schlaghäufigkeit wurde die Beanspruchungsamplitude des Schlagbildes für die drei untersuchten Frequenzen in Abbildung 37 rechts dargestellt. Die Beanspruchungsamplitude entspricht gemäß Abschnitt 5.2.1.1 der Schlaghäufigkeit bei der mittleren Schlagintensität beziehungsweise der Schlaghäufigkeit des Erwartungswertes.

Anhand des linearen Verlaufs der Beanspruchungsamplitude ist eine proportionale Beziehung zu erkennen. Die Verdopplung der Verweildauer führt zu einer annähernd doppelt so hohen Beanspruchung. Es ist ersichtlich, dass damit auch die Gesamtschlagzahl mit der Beanspruchungszeit proportional zunimmt. Die Änderung der Beanspruchungszeit führt damit zu einer Streckung des Beanspruchungszustandes durch Zunahme der Schlagzahl. Zusätzlich konnte im Rahmen dieser Untersuchungsreihe ermittelt werden, dass die Beanspruchungsamplitude zudem von der Frequenz abhängt. Die zuvor festgestellte Unabhängigkeit der Beanspruchungsamplitude von der Frequenz konnte nicht bestätigt werden. In Abbildung 37 rechts ist ein divergierendes Verhalten der Beanspruchungsamplituden bei unterschiedlichen Frequenzen zu erkennen. Die Analyse der Ergebnisse hat damit einen linearen, wenn auch einen schwachen Einfluss auf die Beanspruchungsamplitude aufgezeigt, der im nachfolgenden Kapitel berücksichtigt werden muss. Für eine Beanspruchungszeit von 5 s ist dieser lineare Einfluss am kleinsten und beträgt gemäß den Ergebnissen in Anhang 5 für die drei Frequenzen 150 Hz, 180 Hz und 190 Hz circa 14 %.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verweilzeit im Werkzeug beziehungsweise der Vorschub die Dauer der Beanspruchung auf die Rohrrinnenfläche verändert und damit einen maßgeblichen Einfluss auf die Schlaghäufigkeit besitzt. Die Intensität der Beanspruchung bleibt dabei unverändert. Ähnlich verhält es sich mit der Standardabweichung der Schlagintensitäten. Auch diese ist im Mittel unverändert. Es zeigt sich damit, dass trotz der hohen Dynamik ein sehr robustes Verfahren vorliegt und eine gute Beeinflussungsmöglichkeit der Beanspruchung gegeben ist.

5.3.1.3 Bestimmung der Wirkung der Vorspannung

Die Vorspannung ist die Kraft, mit der das Rohr während eines Abtrags in Position gehalten wird. Sie muss ausreichend groß gewählt werden, damit die Schlagkraft vom Rohr aufgenommen werden kann. Nachfolgend wird untersucht, ob die Veränderung der Vorspannung einen Einfluss auf die Schlaghäufigkeit, die Schlagintensität oder die Schlagverteilung besitzt. Im Experiment wird das Rohr durch Stellschrauben des Sensors mit jeweils definierten Vorspannungskräften zusammengedrückt. Hierzu wird die Vorspannkraft in dem Bereich 1.250 N bis 6.250 N, gemäß Tabelle 13 variiert. Für jede Vorspannung wurde die Beanspruchung bei der Frequenz von 150 Hz ermittelt. Die in der Abbildung 38 dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Vorspannkraft keinen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Größen besitzt. Im Mittel sind die Schlaghäufigkeit, die Schlagintensität und die Schlagverteilung konstant. Auch die Gesamtschlaganzahl bleibt unverändert.

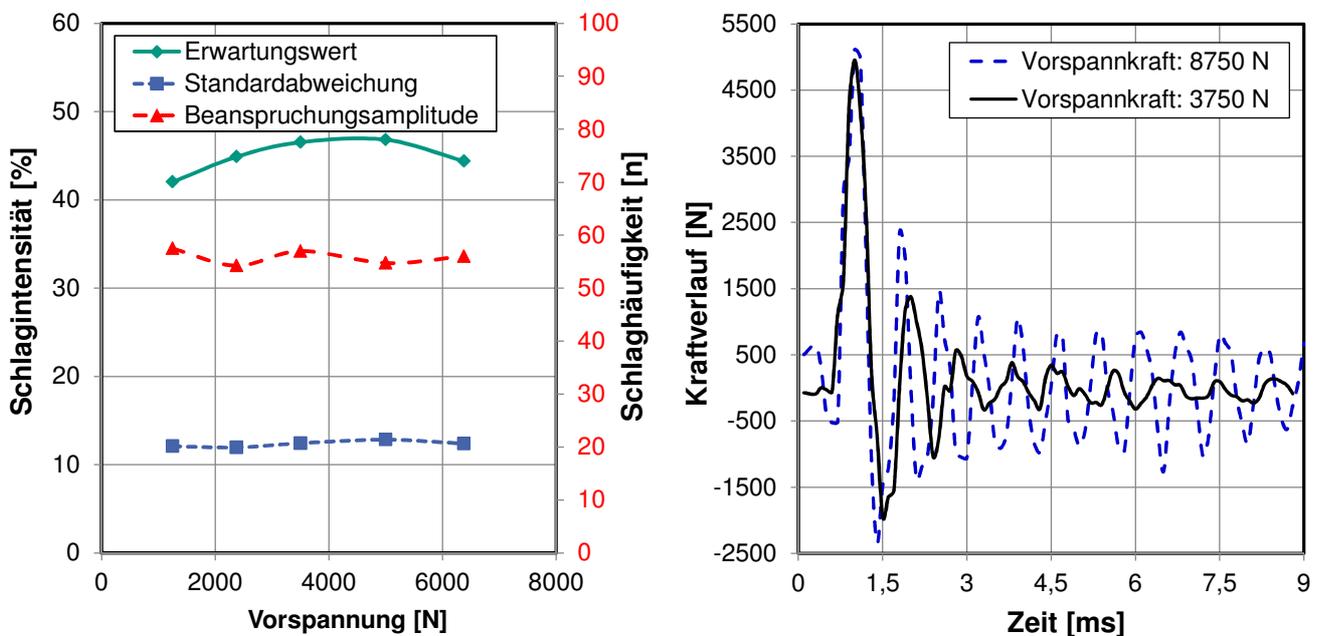


Abbildung 38: Einfluss der Vorspannkraft (links) und eines Kraftverlaufs bei zwei Vorspannungen (rechts)

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde aus dem Schlagbild ein einzelner Schlagverlauf näher betrachtet. In Abbildung 38 rechts sind zwei Schlagverläufe für eine Vorspannkraft von 1.250 N und für eine Vorspannung von 6.250 N vergleichend gegenübergestellt. Das Schlagmaximum sowie die Schlagzeit sind für beide Frequenzen dabei gleich groß. Der Unterschied zwischen beiden Kraftverläufen liegt in der Abklingzeit der Schwingung, die durch den Schlagimpuls im Versuchsstand hervorgerufen wurde. Diese ist bei der höheren Vorspannung deutlich größer ausgeprägt. Durch die Erhöhung der Vorspannung ist eine größere Steifigkeit des Systems gegeben. Infolgedessen zeigt der in Abbildung 38 rechts dargestellte

Kraftverlauf bei größerer Vorspannung eine deutlich längere Abklingzeit. Die abklingenden Schwingungen sind jedoch von der Intensität so klein, dass dabei kein Einfluss auf die Rohrbeanspruchung beziehungsweise den Abtragprozess zu erwarten ist. Da zudem der Abtrag aufgrund des direkten Schlages erfolgt, ist eine große Abklingzeit des Schlages für den Abtrag nicht relevant.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass kein signifikanter Einfluss der Vorspannung auf die Beanspruchungsgrößen festgestellt worden ist. Die Vorspannung beeinflusst das Schwingverhalten des Gesamtsystems, wobei kein Einfluss auf den Abtragprozess erkannt werden kann. Es ist daher ausreichend, dass bei einer Abtragung die Vorspannung ausreichend groß gewählt wird, damit das Rohr sicher in Position gehalten werden kann.

5.3.1.4 Wirkung der außermittigen Zentrierung des Werkzeugträgers

Bei der vertikalen Rohrdekontamination ist das Werkzeug vorzugsweise mittig im Rohr positioniert und erfährt infolge der drehenden Unwucht eine Auslenkung aus dieser Position heraus. Die Werkzeugkeile besitzen aufgrund der Werkzeugsymmetrie zur Rohrrinnenwand jeweils gleiche Abstände. Dadurch ist gewährleistet, dass die einzelnen Keile eine ähnlich hohe Beanspruchung auf das Rohr übertragen und dadurch ein gleichmäßiger Abtrag im Rohrquerschnitt gewährleistet werden kann. Um zu untersuchen, ob durch ein nicht mittig positioniertes Werkzeug im Rohr eine Veränderung der Beanspruchung vorliegt, wurde die Größe der außermittigen Zentrierung in verschiedenen Variationen untersucht. Gemäß Tabelle 13 wurde hierzu das Werkzeug zunächst mittig zentriert und anschließend 2 mm sowie 3 mm beziehungsweise maximal aus der Mitte heraus ausgelenkt. Zusätzlich dazu wurde der Einfluss der Schwerkraft berücksichtigt, die bei einer horizontalen Rohranordnung vorliegt. Bei solch einer Anordnung ist das Werkzeug in der Ausgangstellung außermittig positioniert und liegt in der unteren Rohrhälfte. Zusätzlich drückt die Schwerkraft des Werkzeugträgers auf die untere Rohrhälfte. Zur Nachbildung dieser Situation wurde im Versuchsstand das Werkzeug bei der maximalen Auslenkung zusätzlich mit einer Kraft von 10 N belastet. Dies entspricht der ungefähren Kraft, die das Werkzeug bei einer horizontalen Versuchsanordnung auf die untere Rohrrinnenfläche im Ausgangszustand ausübt. Die Aufbringung der Kraft wurde durch eine 1 kg schwere Masse, welche an einem Faden über eine Umlenkrolle an dem Werkzeugträger befestigt war, realisiert. Dadurch wirkt die aufgeprägte Kraft von 10 N permanent auf den Werkzeugträger, sodass ein ähnlicher Zustand erreicht ist wie bei einer horizontalen Versuchsdurchführung, bei der der Werkzeugträger permanent durch die Schwerkraft in Richtung der Rohrrinnenfläche belastet ist..

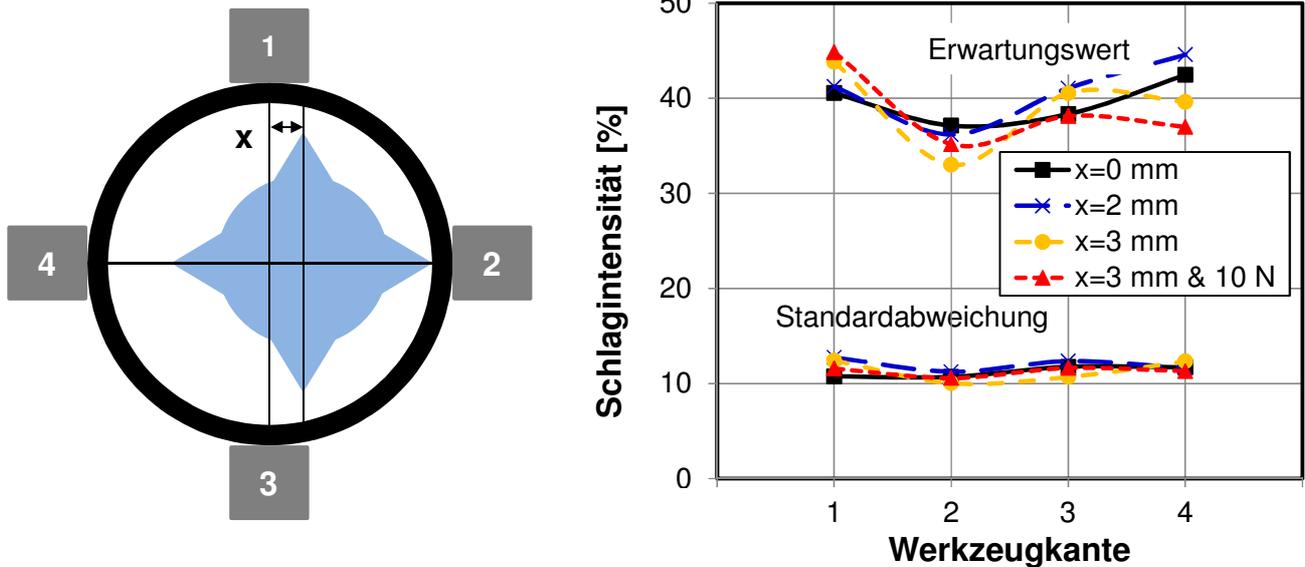


Abbildung 39: Einfluss der außermittigen Zentrierung des Werkzeugs

Bei der Durchführung der Versuche wurde, wie in der schematischen Darstellung in Abbildung 39 links zu sehen, das Werkzeug in Richtung des Sensors Nr. 2 ausgelenkt. Aus den Ergebnissen der Untersuchungsreihe in Abbildung 39 rechts ist zu erkennen, dass ein Einfluss der außermittigen Zentrierung bei allen Variationen vernachlässigt werden kann. Der Erwartungswert sowie die Standardabweichung sind für alle vier Kanten des Werkzeugs ungefähr gleich groß. Eine signifikante Abweichung bei dem Sensor Nr. 2, wo die Auslenkung des Werkzeugs stattfand, konnte nicht festgestellt werden. Zwar gibt es an dieser Stelle beim Erwartungswert ein leichtes Absinken der Werkzeugkante Nr. 2, dieser Effekt wurde jedoch bei allen Versuchen festgestellt und ist damit nicht als Einfluss der außermittigen Zentrierung zu werten. Auch bei der maximalen Auslenkung und der zusätzlichen Belastung des Werkzeugs mit der Kraft von 10 N konnte keine signifikante Änderung der Beanspruchung festgestellt werden. Angesichts der Tatsache, dass im Versuch kurzzeitig Schlagintensitäten von mehreren tausend Newton gemessen werden konnten, sind die oben aufgeführten Ergebnisse nachvollziehbar. Die Belastungshöhe durch die Kraft von 10 N ist bei diesen hohen Schlagintensitäten eher vernachlässigbar klein. Die hohen Beschleunigungen, denen das Werkzeug im Rohr unterworfen ist, führen dazu, dass die außermittige Zentrierung des Werkzeugs keine Rolle spielt. Es ist jedoch anzunehmen, dass bei größeren Abständen zwischen dem Werkzeug und dem Rohr ein Einfluss auf den Beanspruchungszustand vorliegt. Der Grund hierfür liegt in der begrenzten Auslenkung des Werkzeugträgers. Der Wirkungsbereich des Werkzeugträgers ist zum einen durch geometrische Größen der Unwucht und zum anderen durch die Elastizität der Aufhängung des Werkzeugträgers abhängig. Ist der Abstand zwischen Werkzeug und Rohrinnenfläche viel größer als dieser Wirkungsbereich, so kann eine Kraftübertragung nicht stattfinden. Der Abstand

zwischen dem Werkzeug und dem Rohr sollte daher idealerweise stets kleiner sein als der Wirkungsbereich des Werkzeugträgers.

In einer weiteren Untersuchungsreihe wurde zusätzlich geprüft, ob die Intensität der Beanspruchung gezielt verändert werden kann. Der Werkzeugträger wurde deshalb mithilfe eines elastischen Fadens an einer festen Stütze befestigt. Dabei wurde der Werkzeugträger in Richtung des Sensors Nr. 2 ausgelenkt und vorgespannt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe sind in der nachfolgenden Abbildung 40 dargestellt.

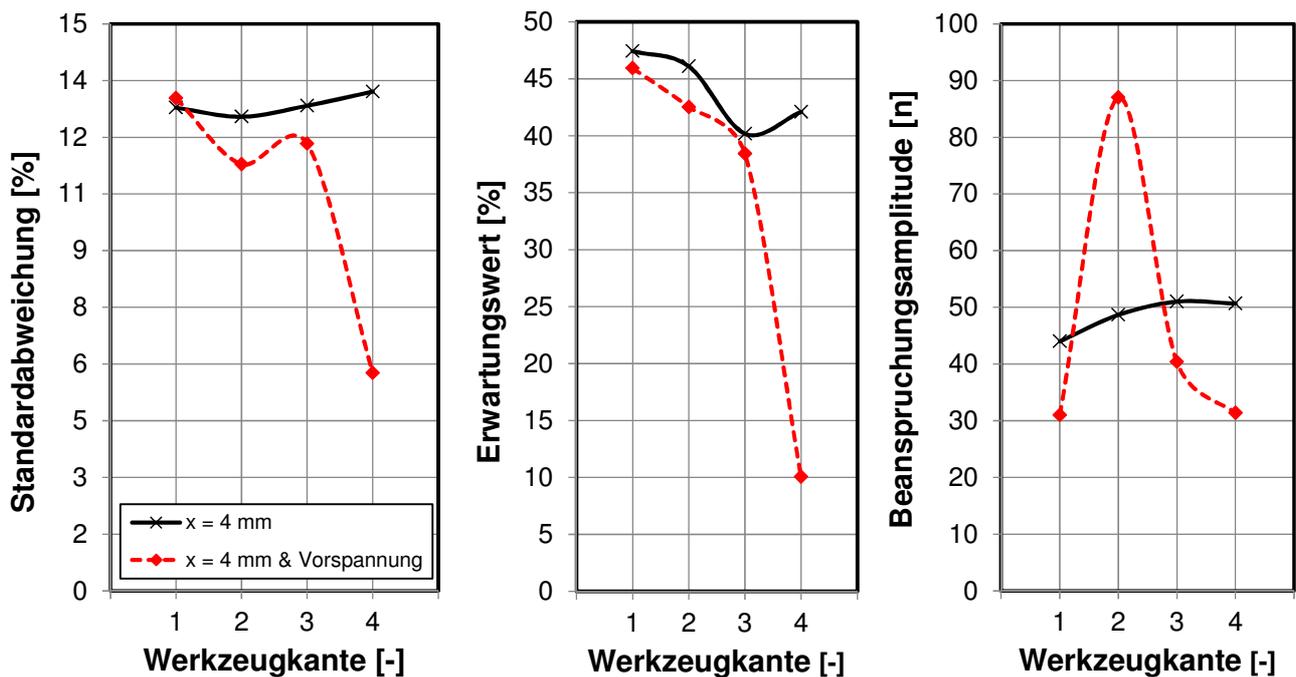


Abbildung 40: Einfluss auf Standardabweichung, Erwartungswert und Beanspruchungsamplitude

Durch die Befestigung an der Stütze ist die Bewegung des Werkzeugträgers in Richtung des 4. Sensors stark eingeschränkt. Dagegen ist durch das Anlegen der Werkzeugkante an der Rohrwand in Richtung des Sensors Nr. 2 eine erhöhte Beanspruchung zu erwarten. Entsprechend zeigen die Ergebnisse dass eine starke Abnahme des Erwartungswertes um 50 % und der Standardabweichung um fast 80 % beim Sensor Nr. 4 vorliegt. Zudem steigt die Schlaghäufigkeit am Sensor Nr. 2 deutlich an. Im Vergleich zum Sensor Nr. 4 liegt eine Verdreifachung der Schlaghäufigkeit vor. Durch diese einfache Maßnahme kann der Beanspruchungszustand gezielt beeinflusst und an einer Stelle konzentriert zur Anwendung gebracht werden.

Die Werte für ein reines Anlegen des Sensors an der Rohrwandfläche durch eine außermittige Auslenkung um 4 mm zeigen keine signifikanten Änderungen des Beanspruchungszustands,

sodass auch bei dieser Versuchsreihe bestätigt wurde, dass der Einfluss auf die Beanspruchung einer nicht außermittigen Zentrierung des Werkzeugs vernachlässigt werden kann. Es wurde weder bei der Häufigkeit der Schläge noch bei der Schlagintensität oder der Standardabweichung ein signifikanter Unterschied im Beanspruchungszustand der Rohrwand festgestellt. Eine horizontale Rohrdekontamination sollte unter den hier geltenden Randbedingungen vergleichbare Ergebnisse zu einer vertikalen Rohrdekontamination liefern. Deutliche Unterschiede in der Schlaghäufigkeit, in der Intensität und in der Standardabweichung sind nur durch eine Einschränkung des Bewegungsspielraums des Werkzeugträgers zu erkennen. Durch die Festlegung der Bewegungsrichtung des Werkzeugträgers wird der Beanspruchungszustand direkt beeinflusst und kann gezielt auf einer Stelle konzentriert zur Anwendung gebracht werden. Die Kombination aus Vorspannung des Werkzeugs mit einer definierten Kraft und einer zusätzlichen Einschränkung der Bewegungsrichtung kann einen selektiven Abtrag ermöglichen. Für eine passende konstruktive Ausführung stehen hierbei verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter diskutiert werden.

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Abstand zwischen dem Rohr und der Werkzeugkante näher betrachtet, um damit den Einfluss von dem Wirkungsbereich des Werkzeugträgers zu analysieren.

5.3.1.5 Einfluss des Abstands zwischen Werkzeug und Rohr

Der Werkzeugdurchmesser beeinflusst den Abstand zwischen der Werkzeugkante und der Rohrwandfläche und besitzt gemäß der Einflussmatrix eine hohe kumulierte Einflussstärke. Um den Einfluss auf die Beanspruchung zu erfassen, werden nachfolgend unterschiedliche Abstände untersucht. Dabei wird der Rohrdurchmesser bei unverändertem Werkzeugdurchmesser verändert. Dadurch ist sichergestellt, dass der Beanspruchungszustand mit jeweils dem gleichen Werkzeug und der gleichen Schlagmasse ermittelt wird. Zudem wird die Wandstärke des Rohrs konstant gelassen, sodass der Einfluss der Wanddicke ausgeschlossen werden kann. Es werden, wie in Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgeführt, die Abstände 1 mm, 2 mm, 3 mm und 4 mm bei jeweils zwei Frequenzen untersucht.

Die Ergebnisse in Abbildung 41 verdeutlichen, dass der Einfluss des Abstands auf den Beanspruchungszustand groß ist. Besonders gut ist dies an dem Verlauf der Beanspruchungsamplitude in Abbildung 41 rechts zu erkennen. Der kleiner werdende Abstand führt zu einer Verringerung des Bewegungsspielraums des Werkzeugs und damit zu einer Erhöhung der Kontaktwahrscheinlichkeit. Bei einer Vergrößerung des Abstands von 1 mm auf 2 mm ist ein Abfall von circa 78 % festzustellen. Bei einer weiteren Vergrößerung des Abstands

auf 3 mm beziehungsweise 4 mm ist der Abfall um circa 40 % beziehungsweise 19 % geringer. Ähnliche Ergebnisse wurden auch mit der Frequenz von 190 Hz festgestellt. Der in Abbildung 41 rechts dargestellte Verlauf der Beanspruchungsamplitude zeigt zudem, dass bei einem Abstand, der kleiner als 3 mm ist, ein Unterschied zwischen den Frequenzen zu erkennen ist. Die Ursache hierfür liegt in der Abnahme der Schlagunterschiede bei kleiner werdendem Abstand. Die Anzahl der Schlagklassen nimmt damit auch ab, sodass es zu einem Anstieg der relativen Schlaghäufigkeit pro Schlagklasse und damit zu einem starken Anstieg der Beanspruchungsamplitude mit abnehmendem Abstand kommt. Wird zusätzlich die Frequenz erhöht, so führt die Zunahme der Standardabweichung zu einem Abfall der relativen Schlaghäufigkeit. Dies stellt die Ursache für den Anstieg der Beanspruchungsamplitude bei kleiner Frequenz und kleinem Abstand dar.

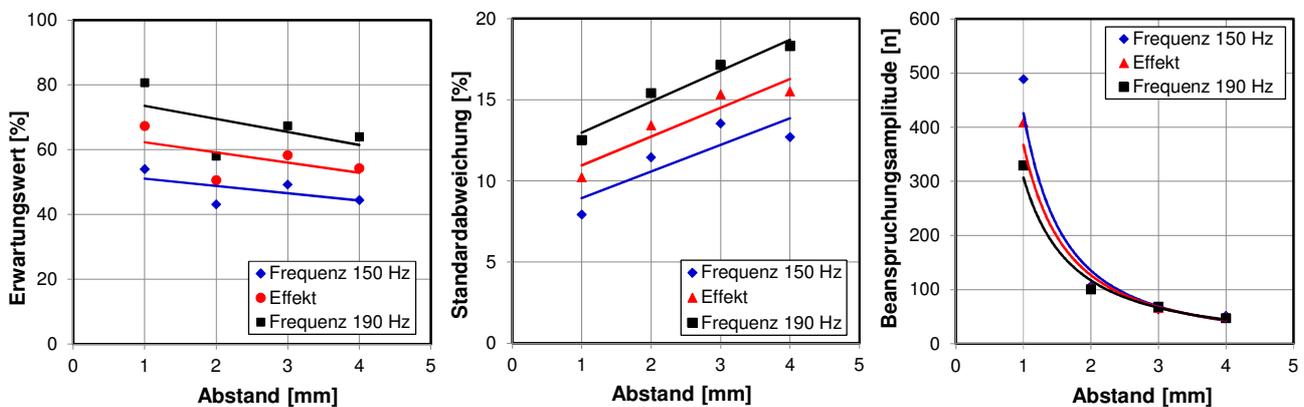


Abbildung 41: Einfluss des Abstands auf den Erwartungswert, die Standardabweichung und Beanspruchungsamplitude

Der Abstand ist eine entscheidende Größe, um die Höhe der Beanspruchung des Rohrs zu steuern. Der kleiner werdende Abstand ist mit einer starken Zunahme der Schlaghäufigkeit verbunden. Die Analyse der Schlagreihenfolge der Werkzeugkanten zeigt zudem, dass diese mit kleiner werdendem Abstand zunehmend in der Drehrichtung der Werkzeugkante erfolgt und damit von der Drehfrequenz der Unwucht beeinflusst wird. Im theoretischen Grenzfall, für den Abstand $x = 0$ mm, ist daher eine Schwingung des Rohrs mit der Frequenz des Werkzeugträgers zu erwarten. Eine Relativbewegung zwischen dem Werkzeugträger und dem Rohr existiert dabei nicht. Es liegt für diesen Grenzfall auch keine Beanspruchung des Rohrs durch Schlageinwirkung vor. Für einen geringfügig größeren Abstand als null Millimeter existiert eine theoretische Obergrenze der Gesamtschlagzahl. Zur theoretischen Bestimmung der Gesamtschlagzahl wurde im Rahmen der Arbeit die Formel 5-8 hergeleitet. Diese gibt mithilfe Frequenz, Kantenanzahl des Werkzeugs und der Beanspruchungszeit die maximale Gesamtschlagzahl wieder.

$$n_{\max} = f \cdot K_a \cdot t$$

Formel 5-8

mit den Parametergrößen:

n_{\max}	Maximale Gesamtschlagzahl
f	Frequenz
K_a	Keilanzahl des Werkzeugs
t	Beanspruchungszeit

Bei dieser Grenzbetrachtung – im Falle eines zunehmend kleiner werdenden Abstands – nehmen die Unterschiede der Schläge im Beanspruchungszustand ab. Es treten vermehrt Schläge ähnlicher Intensitäten auf. Aufgrund des geringeren Bewegungsspielraums wird die Bewegung des Werkzeugträgers nicht mehr durch den Rückprall des Werkzeugs beeinflusst, sondern durch die Drehrichtung der Unwucht. Entsprechend klein sind die Unterschiede der kinetischen Energie des Werkzeugs beim Aufprall. Zu erkennen ist dies in der mit abnehmendem Abstand kleiner werdenden Standardabweichung in Abbildung 41 Mitte. Bei abnehmendem Abstand wird die Standardabweichung kleiner. Für die Frequenz von 190 Hz wurde eine Abnahme um circa 23 % bei einer Verkleinerung des Abstands von 2 auf 1 mm festgestellt. Bei der Veränderung des Abstands von 3 auf 2 mm beträgt die Abnahme circa 11 % und bei einer Verkleinerung des Abstands von 4 auf 3 mm beträgt sie noch circa 7 %. Im umgekehrten Falle – bei zunehmendem Abstand zwischen Werkzeug und Rohrrinnenfläche – nimmt aufgrund der größeren Beweglichkeit des Werkzeugträgers die Kontaktwahrscheinlichkeit zunehmend ab. Bei diesem Fall bestimmt der Rückprall des Werkzeugs an der Rohrrinnenwand verstärkt die Schlagreihenfolge. Entsprechend nehmen die Schlagunterschiede im Beanspruchungszustand zu, sodass die Standardabweichung mit größerem Abstand ansteigt.

Im Vergleich dazu ist beim Erwartungswert beziehungsweise bei der Schlagintensität ein gegensätzlicher Effekt festzustellen. Bei kleinen Abständen wird die Schlagintensität durch die Beschleunigungen des Werkzeugträgers bestimmt. Durch den begrenzten Bewegungsspielraum des Werkzeugträgers sind die Bewegungsverluste klein und die kinetische Energie des Werkzeugs steht unmittelbar dem Schlag zur Verfügung. Es ist daher nachvollziehbar, dass die Schlagintensität, wie in Abbildung 41 links zu erkennen ist, bei kleiner werdenden Abständen zunimmt.

Der Einfluss des Abstands auf die Standardabweichung und den Erwartungswert führt zu einer direkten Beeinflussung der auftretenden Anzahl der Schläge im Rohr. Mit zunehmendem Abstand ist eine Tendenz der Schlagzahl in Richtung Null festzustellen, wobei ein abrupter Abfall auf den Wert Null, ab einer kritischen Größe des Abstands, zu erwarten ist. Die Ursache hierfür liegt in dem begrenzten Wirkungsbereich des Werkzeugträgers, der im vorliegenden Fall von der

Beweglichkeit der flexiblen Welle bestimmt wird. Bei zu großen Abständen ist die kinetische Energie nicht mehr ausreichend groß, um den Werkzeugträger zur Rohrwand zu bewegen. Bei fehlendem Schlag und Rückprall findet daher im Falle der vertikalen Rohrdekontamination und der mittigen Ausrichtung des Werkzeugträgers im Rohr keine Schlagdynamik im Rohr statt, wodurch auch in diesem zweiten Grenzfall keine Beanspruchung durch Schlageinwirkung auf das Rohr übertragen wird. Im Falle einer horizontalen Versuchsanordnung und der aufgrund der Schwerkraft außermittigen Zentrierung des Werkzeugträgers ist mit einer partiellen Beanspruchung der unteren Rohrhälfte zu rechnen. Der Verlauf der Schlaghäufigkeit bei Abstandsänderung ist in Abbildung 42 links anhand der oben durchgeführten Überlegungen für eine Werkzeugkante dargestellt. Hierzu wurde die Messkurve, basierend auf den theoretischen Überlegungen, interpoliert und die beiden Grenzwerte in Abbildung 42 eingezeichnet. Der starke Einfluss des Abstands auf den Beanspruchungszustand ist an der Darstellung deutlich zu erkennen.

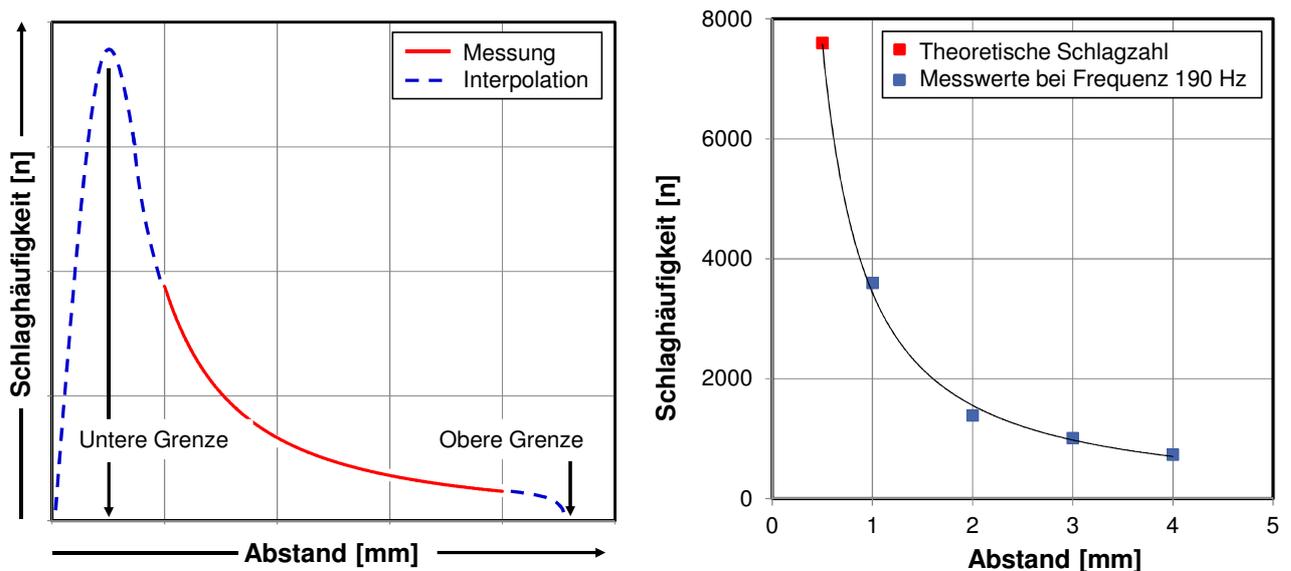


Abbildung 42: Qualitativer Schlagverlauf für eine Werkzeugkante sowie Gesamtschlagverlauf für ein Werkzeug mit vier Keilen und theoretisch maximaler Schlagzahl

In Abbildung 42 rechts wurde der theoretisch berechnete Wert der Gesamtschlagzahl anhand der Formel 5-8 berechnet und in die Messreihe eingefügt. Mithilfe einer Potenzfunktion kann dieser theoretische Wert die Messreihe ergänzen und unterstreicht damit die theoretischen Überlegungen.

Der Einfluss des Abstands hat sich als ein wichtiges Kriterium herausgestellt, das alle Einflussfaktoren des Beanspruchungszustandes stark beeinflusst. Die Zusammenhänge

zwischen Schlagwirkung, Schlagreihenfolge und Schlagunterschieden können mithilfe dieses Einflussfaktors beschrieben werden.

5.3.1.6 Bestimmung der Wirkung der Kantenanzahl des Werkzeugs

Die bisher ermittelten Wirkungen der Einflussfaktoren auf den Beanspruchungszustand wurden mittels eines Werkzeugs mit vier Keilen durchgeführt. Durch die symmetrische Anordnung der Keile konnte im Versuchsstand die Schlageinwirkung nach Betrag, Amplitude und Richtung ermittelt werden. In der Praxis wird für eine Dekontaminationsaufgabe ein Werkzeug mit deutlich größerer Keilanzahl benötigt. Die Keilanzahl eines Werkzeugs richtet sich nach dem Wirkungsbereich des Keils sowie nach dem Durchmesser des Werkzeugs. Eine Abschätzung der notwendigen Keilanzahl wurde in Abschnitt 4.2.2 anhand der Formel 4-4 durchgeführt. Um zu überprüfen, inwieweit sich der Beanspruchungszustand in Abhängigkeit der Keilanzahl verändert, wird nachfolgend die Beanspruchung eines Werkzeugs mit zwei Keilen sowie eines Werkzeugs mit acht Keilen untersucht. Die Ergebnisse werden dem bereits ermittelten Beanspruchungszustand des Werkzeugs mit vier Keilen gegenübergestellt. Damit soll der Einfluss der Keilanzahl im Beanspruchungsmodell berücksichtigt werden.

Die Ermittlung der Beanspruchung bei einem Werkzeug mit zwei Keilen kann im Versuchsstand ähnlich wie bei einem Werkzeug mit vier Keilen durchgeführt werden. Die einzelnen Keile des Werkzeugs sind dabei jeweils auf zwei Scherkraftsensoren ausgerichtet. Die übrigen zwei Sensoren werden durch Schlageinwirkung aufgrund fehlender Keile nicht belastet. Entsprechend kann die in Abschnitt 5.1.1 vorgestellte Vorgehensweise zur Schlagerkennung eingesetzt werden. Bei der Schlagerkennung eines Werkzeugs mit acht Keilen muss der Algorithmus zur Schlagerkennung angepasst werden, da die Anzahl der Scherkraftsensoren im Versuchsstand nicht verändert werden kann. Die Schwierigkeit dabei liegt in der Ermittlung der Schlagrichtung und der Schlagamplitude. Anders als bei einem Werkzeug mit vier Keilen ist es bei einem Werkzeug mit acht Keilen notwendig, dass die Werte aller vier Scherkraftsensoren bei der Auswertung berücksichtigt werden, um die Schlagrichtung und die Schlagintensität zu ermitteln. Das Werkzeug mit acht Keilen wird im Versuchsstand so ausgerichtet, dass jeweils vier Keile auf die vier Scherkraftsensoren ausgerichtet sind. Die restlichen Keile befinden sich dabei jeweils zwischen zwei Scherkraftsensoren. Bei der Auswertung wird dann zwischen Schlägen unterschieden, die direkt in Richtung eines Scherkraftsensors wirken, und Schlägen, die zwischen zwei Sensoren auftreten. Bei der Auswertung der Messung wird zunächst eine Fallunterscheidung getroffen, um zu erkennen, ob ein Schlag zwischen zwei Sensoren aufgetreten ist oder auf den Sensor direkt wirkt. Kommt es zu einem Schlag zwischen den Sensoren, so ist der Betrag des Schlages auf jeweils vier Scherkraftsensoren aufgeteilt und

kann durch eine vektorielle Addition der Einzelkomponenten der Scherkraftsensoren mittels des Satzes von Pythagoras ermittelt werden. Die genaue Vorgehensweise wird in Anhang 4 exemplarisch für einen Schlag, mit der Auftreffstelle zwischen zwei Sensoren, durchgeführt. Für den Fall, dass die Schlagwirkung in Richtung des Sensors auftritt, erfolgt die Auswertung gemäß der Beschreibung im vorherigen Abschnitt 5.1.

Die nachfolgende Abbildung 43 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungsreihe für die Frequenz von 150 Hz an. In Abbildung 43 links ist der Beanspruchungszustand für ein Werkzeug mit vier und acht Kanten dargestellt. Dieser setzt sich zusammen aus dem Beanspruchungszustand infolge der Schläge, die zwischen den Scherkraftsensoren (Richtung 1) gemessen werden, und aus Schlägen, die in Richtung der Scherkraftsensoren (Richtung 2) auftreten.

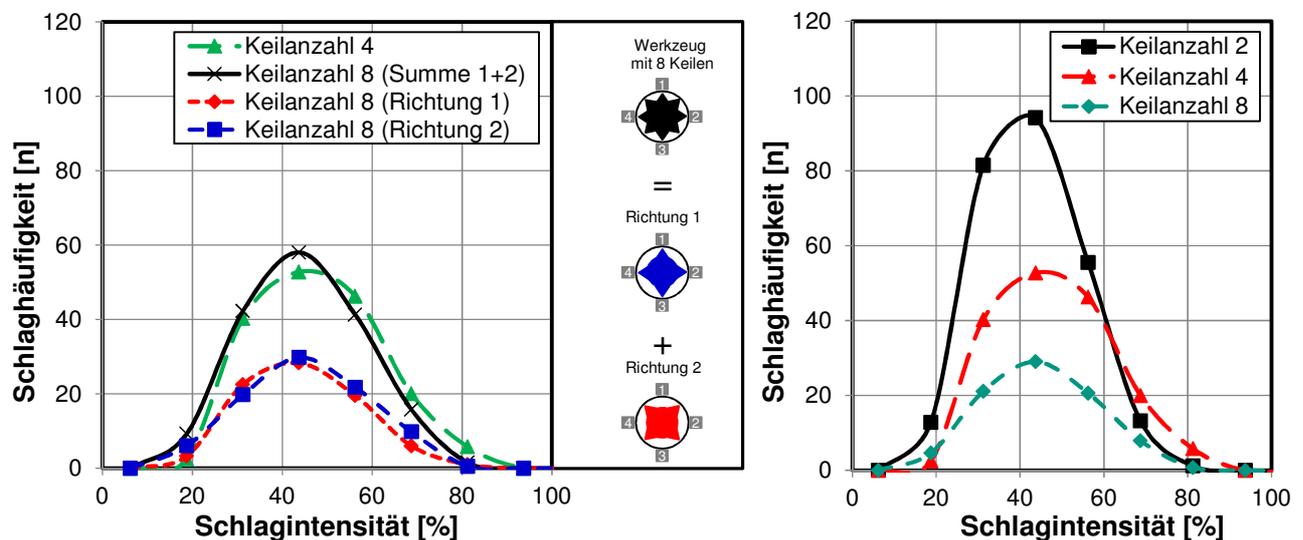


Abbildung 43: Beanspruchungszustand für ein Werkzeug mit unterschiedlichen Keilen bei einer Frequenz von 150 Hz

Beide Beanspruchungszustände haben einen ähnlichen Verlauf und zeigen damit im Mittel eine gleichmäßige Verteilung des Beanspruchungszustandes. Die Schlagintensität, die Standardabweichung sowie die Beanspruchungsamplitude sind dabei ähnlich hoch ausgeprägt. Wird die Summe dieser beiden Beanspruchungen gebildet, so ergibt sich ein Beanspruchungszustand der vergleichbar ist mit dem Beanspruchungszustand eines Werkzeugs mit vier Keilen, der unter denselben Randbedingungen ermittelt worden ist. Die Verdoppelung der Keilanzahl, wie sie beim Werkzeug mit acht Kanten der Fall ist, ändert damit nur geringfügig die Beanspruchung des Rohrs. Die Schlagintensität beziehungsweise der Erwartungswert bleibt unverändert. Der gemessene Effekt bei einer Verdoppelung der Kantenanzahl von vier auf acht Keile liegt für die drei untersuchten Frequenzen deutlich unter 5 % und kann vernachlässigt werden. Bei der Standardabweichung liegt der Effekt bei circa 5 %. Der Ursache für die

Zunahme der Standardabweichung liegt in der höheren Kontaktwahrscheinlichkeit des Werkzeugs mit der Rohrrinnenwand. Dies führt wiederum zu unterschiedlichen Beschleunigungskomponenten des Werkzeugs, was sich in unterschiedlichen Schlagintensitäten und damit in einer größer werdenden Standardabweichung bemerkbar macht.

Bei einer Erhöhung der Keilanzahl wird die Beanspruchung auf einen größeren Bereich verteilt. Infolgedessen sinkt bei einer Verdoppelung der Keilanzahl von vier auf acht Keile die Beanspruchungsamplitude beziehungsweise die Schlaghäufigkeit bei einer Frequenz von 150 Hz um etwa die Hälfte (49 %) und bei der Frequenz von 180 Hz beziehungsweise 190 Hz um circa 56 % beziehungsweise circa 49 %. Die Ergebnisse zeigen damit, dass die kinetische Energie des Werkzeugträgers während der Beanspruchungszeit in Abhängigkeit der Keilanzahl auf die Rohrrinnenfläche übertragen wird. Bei einer Vergrößerung der Keilanzahl nimmt damit die Schlaghäufigkeit pro Kante ab.

Zur Verifizierung der Ergebnisse wurde zusätzlich ein Werkzeug mit zwei Keilen untersucht. Exemplarisch ist in Abbildung 43 rechts die Beanspruchung für zwei, vier und acht Keile bei einer Frequenz von 150 Hz dargestellt und zeigt bei einem ähnlichen Verlauf eine Erhöhung der Beanspruchung bei abnehmender Schlaganzahl. Auch hier zeigt sich, dass der Erwartungswert annähernd konstant bleibt.

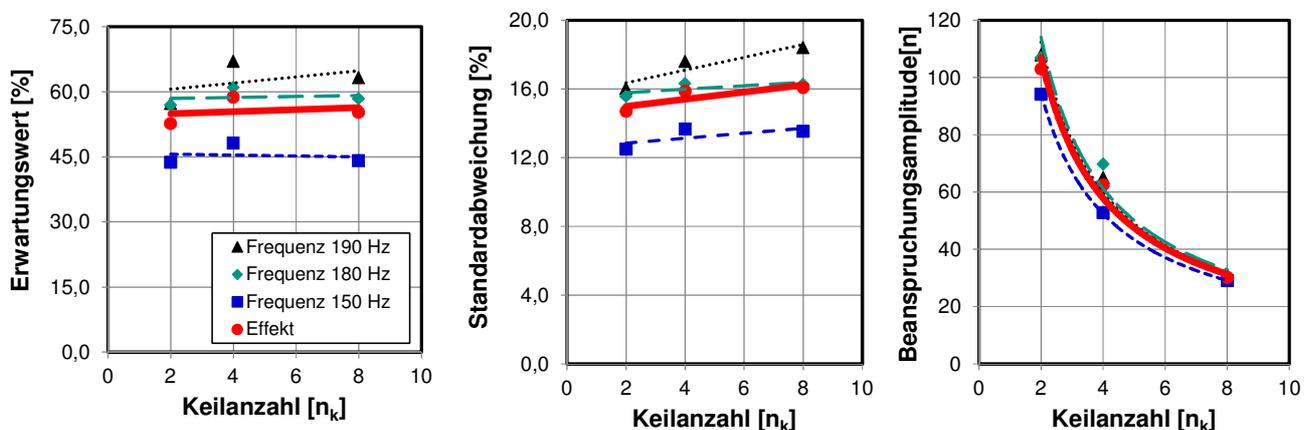


Abbildung 44: Einfluss der Keilanzahl auf den Beanspruchungszustand bei der Untersuchung eines Werkzeugs mit zwei, vier und acht Keilen

Wie in Abbildung 44 links abgebildet, ist der Verlauf des Erwartungswertes auch für die Frequenz von 180 Hz ähnlich. Die Abweichung bei der Frequenz von 190 Hz ist dabei auf Messungenauigkeiten zurückzuführen. Es liegt ein vernachlässigbarer Effekt der Keilanzahl auf den Erwartungswert vor. Wie in Abbildung 44 links auch zu erkennen ist, hängt der Erwartungswert deutlich von der Frequenz ab und zeigt damit, wie zuvor festgestellt, die

Abhängigkeit der Schlagintensität von der kinetischen Energie des Werkzeugträgers. Der geringe Einfluss bei der Standardabweichung konnte auch bei dem Werkzeug mit zwei Keilen bestätigt werden. Der Effekt ist geringer und beträgt in diesem Fall circa 4 %. Die Verdoppelung der Keilanzahl von zwei auf vier Keile führt zudem dazu, dass die Beanspruchungsamplitude im Mittel für die drei untersuchten Frequenzen um 39 % geringer wird. Der Effekt, dargestellt in Abbildung 44 rechts, ist bei dieser Größe damit sehr stark ausgeprägt. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse des Werkzeugs mit zwei Keilen die oben durchgeführten Ergebnisse mit acht Keilen.

Der Verlauf der Gesamtschlagzahl für ein Werkzeug mit zwei, vier und acht Keilen ist in Abbildung 45 links dargestellt. Durch die größere Keilanzahl nimmt die Gesamtschlagzahl, wegen der Zunahme der Standardabweichung deutlich zu. Die relative Schlaghäufigkeit bezogen auf eine Kante nimmt hingegen im Mittel um circa 40 % ab.

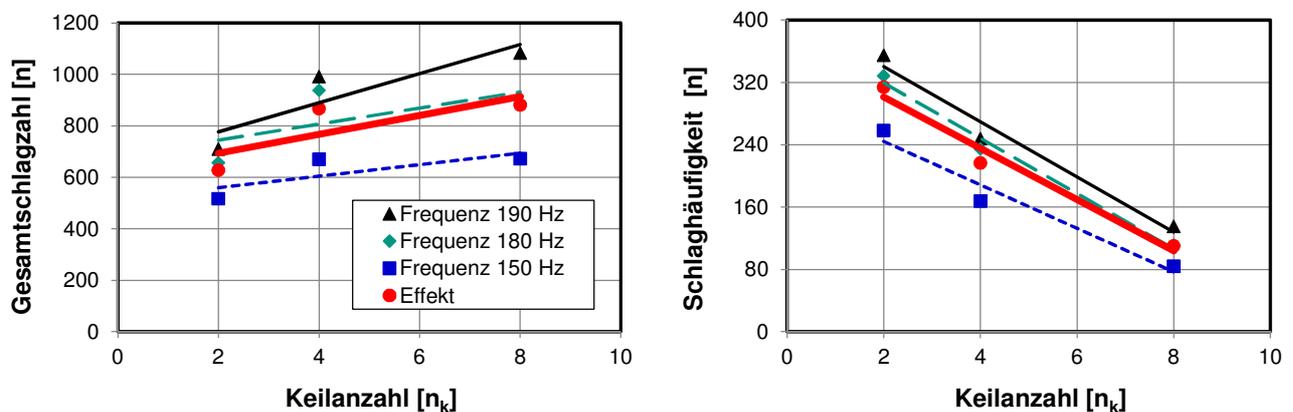


Abbildung 45: Schlagverteilung bezogen auf einen Keil bei unterschiedlicher Keilanzahl

Zusammengefasst hat die Untersuchung des Einflusses der Keilanzahl auf die Beanspruchung des Rohrs ergeben, dass mit steigender Anzahl der Keile eine Reduzierung der Schlaghäufigkeit pro Keil festgestellt werden kann. Die Schlagintensität, die durch den Erwartungswert beschrieben wird, bleibt hingegen konstant. Darüber hinaus wurde eine leichte Erhöhung der Standardabweichung festgestellt. Bei allen drei Frequenzen zeigt sich ein ähnlicher Effekt. Die Schlagverteilung auf der Rohrwand ist maßgeblich für einen gleichmäßigen Abtrag verantwortlich. Dieser kann hauptsächlich durch die Keilanzahl beeinflusst werden.

Eine gleichmäßige Schlagverteilung beziehungsweise Beanspruchung auf der Rohrwand ist entscheidend für einen gleichmäßigen Abtrag. Im Wesentlichen wird dies durch den werkzeugbedingten Einflussfaktor Keilanzahl vorgegeben. Es ist jedoch auch ein Einfluss der prozessbedingten Einflussfaktoren gegeben. Durch eine Rotation des Werkzeugs kann bei konstanter Keilanzahl die Beanspruchung des Werkzeugs auf einen größeren Bereich der

Rohrinnenfläche verteilt werden. Es ist daher wichtig, dass die Drehfreiheit des Werkzeugträgers stets gegeben ist. Erst das Zusammenspiel dieser beiden Faktoren ermöglicht einen gleichmäßigen Abtrag.

5.3.1.7 Zusammenfassung der univariaten Datenanalyse

Die univariate Analyse wurde durchgeführt, um die Einzelwirkungen der unterschiedlichen Faktoren zu erfassen, um im nächsten Abschnitt ein Gesamtmodell aufzubauen. Durch die Variation einer Faktorgröße konnten die Wirkungen der untersuchten Faktoren anhand des Beanspruchungsmodells aus Abschnitt 5.2, bestehend aus den Größen Standardabweichung, Erwartungswert und Beanspruchungsamplitude, beschrieben werden. Bei den Einflussfaktoren Frequenz, Abstand, Verweilzeit, außermittige Zentrierung und Kantenanzahl konnten jeweils signifikante Einflüsse auf die genannten Größen des Modells erkannt werden. Bei den Einflussgrößen Vorspannung sowie Einspannung konnte kein Einfluss auf den Beanspruchungszustand erkannt werden. Ebenso liegt bei der reinen außermittigen Zentrierung des Werkzeugs kein Einfluss auf die Untersuchungsgröße vor. Erst wenn das Werkzeug zusätzlich zur außermittigen Zentrierung mit einer Kraft belastet wird, ist ein signifikanter Einfluss zu erkennen. Da dieser Einfluss erst durch eine Modifikation des Werkzeugträgers erreicht werden kann, werden nachfolgend dieser Einflussfaktor sowie auch die beiden Faktoren Vorspannung und Einspannung in der nachfolgenden mathematischen Beschreibung des Gesamtmodells nicht weiter berücksichtigt. Die meisten der beobachteten Einflüsse können durch lineare Modelle gut wiedergegeben werden. Nichtlineare Einflüsse liegen bei der Beanspruchungsamplitude vor. Im nachfolgenden Abschnitt werden die einzelnen Wirkungen mathematisch beschrieben und in einem Gesamtmodell zur Beschreibung der Beanspruchung zusammengefasst.

5.3.2 Mathematische Modellierung des Beanspruchungszustandes

Die Beanspruchung im Rohr infolge der Schlagwirkung kann anhand des Modells einer Normalverteilung, wie in Abschnitt 5.2 erläutert, erklärt werden. Zur vollständigen Beschreibung der Beanspruchung werden die drei voneinander unabhängigen Größen Standardabweichung, Erwartungswert und Beanspruchungsamplitude benötigt. Bei der mathematischen Formulierung einer Normalverteilung gemäß der Dichtefunktion in Formel 5-3 genügen jedoch die beiden Größen Standardabweichung und Erwartungswert. Dabei korreliert die Amplitude der Normalverteilung mit der Größe Standardabweichung, sodass die Fläche unter der Verteilungskurve gemäß der Dichtefunktion immer den Wert Eins annimmt. Die Wahrscheinlichkeit, einen Datenwert einer Normalverteilung unter der Standardnormalverteilung

zu finden, beträgt damit 100 %. Im Rahmen dieser Untersuchung ist eine Entkoppelung der Amplitude von der Standardabweichung notwendig, damit drei voneinander unabhängige Größen zur Beschreibung der Beanspruchung auf Basis der Normalverteilung herangezogen werden können. Das Ziel der nachfolgenden Vorgehensweise ist der Aufbau eines Modells, das die Beanspruchung des Rohrs in Form der Schlagintensität und der Schlaghäufigkeit direkt angibt. Hierzu wird nachfolgend ein Faktor C eingeführt, mit dem die Dichtefunktion in Formel 5-9 multipliziert wird. Der Faktor C kann den Wert der Standardabweichung oder den Wert Eins annehmen. Entspricht dieser Faktor dem Wert der Standardabweichung, so fällt die Standardabweichung im Nenner der Dichtefunktion weg und die Amplitude der Verteilung wird von der Standardabweichung entkoppelt. Zudem wird ein Faktor A eingeführt, der die Beanspruchungsamplitude, dargestellt in Abbildung 29, so anpasst, dass dieser mit der aus der Messung stammenden Schlaghäufigkeit übereinstimmt. Die Schlaghäufigkeit der jeweiligen Schlagintensitätsklassen kann somit direkt aus dem Verlauf abgelesen werden. Die restlichen Faktoren der Dichtefunktion werden zu einem Faktor B zusammengefasst. Für den Fall $A = 1$ sowie $C = 1$ liegt eine Normalverteilung gemäß der Dichtefunktion vor. Die vorgenommenen Modifizierungen sind daher nur gültig für A und $C \neq 1$. In der Formel 5-9 sind die mathematischen Gleichungen des Beanspruchungsmodells zusammengefasst:

$$f(x, x_f, x_d, x_t, x_k) = A \cdot B \cdot C \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2}$$

$$A = f(x_f, x_d, x_t, x_k)$$

$$B = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}}$$

$$C = \sigma \text{ oder } 1$$

Formel 5-9

mit den Parametergrößen:

A, B, C	[-]	Größe zur Anpassung des Beanspruchungsmodells
x	[%]	Laufvariable zur Beschreibung der Schlagintensität
σ	[-]	Standardabweichung
μ	[-]	Erwartungswert
x_f, x_d, x_t, x_k	[-]	Verfahrensvariablen Frequenz, Abstand, Zeit und Keilanzahl

Wie zu Beginn dieses Abschnitts erläutert, besteht die Beanspruchung des Rohrs aus Schlägen unterschiedlicher Intensität, Häufigkeit sowie Richtung beziehungsweise Verteilung. Die im vorherigen Abschnitt bestimmten Einzelwirkungen der Verfahrensvariablen verändern die Beanspruchung des Rohrs. Ziel dieses Abschnitts ist es, diese Einzelwirkungen in einem Gesamtmodell zu verknüpfen. Im Gesamtmodell werden daher die Wirkungen der Variablen auf

die Beanspruchung des Rohrs zusammengeführt. Die wichtigsten Variablen sind dabei die Frequenz x_f , der Rohrdurchmesser beziehungsweise der Abstand x_d zwischen dem Werkzeug und dem Rohr sowie die Beanspruchungszeit x_t , die dem Vorschub des Werkzeugträgers entspricht. Zudem ist die Keilanzahl x_k des Werkzeugs eine weitere wichtige Variable, die die Verteilung der Beanspruchung im Rohr regelt. Die Wirkungen dieser Variablen auf die Größen des Beanspruchungsmodells (A , B , C , σ , μ) werden als Nächstes mithilfe einer Regressionsanalyse erfasst. Zur Bestimmung der Regressionsparameter kommt die Methode der kleinsten Quadrate zum Einsatz, die die Regressionsparameter so bestimmt, dass die Summe der quadratischen Abweichungen der Datenwerte von der Ausgleichskurve ein Minimum annimmt. Im Anschluss an die mathematische Erfassung der Einzelwirkungen der Variablen erfolgt die Verknüpfung der einzelnen Regressionsfunktionen, sodass ein mehrdimensionales Datenfeld in Form eines Gesamtmodells gebildet wird und damit die Beanspruchung des Rohrs durch die Einflussfaktoren beziehungsweise die Variablen beschrieben werden kann.

5.3.2.1 Einfluss der Frequenz und des Abstands

Der Einflussfaktor Frequenz besitzt gemäß den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3.1 einen linearen Einfluss sowohl auf die Standardabweichung als auch auf den Erwartungswert. Der lineare Einfluss auf die Beanspruchungsamplitude konnte bei der Variation der Verweilzeit nachgewiesen werden. Die Ausgleichfunktionen, die mittels der Methode der kleinsten Quadrate hergeleitet wurden, sind in der nachfolgenden Tabelle 15 aufgeführt.

Tabelle 15: Beanspruchungszustand in Abhängigkeit der Frequenz

Abstand	Standardabweichung	Erwartungswert	Faktor A	Faktor C
$x_d = 3 \text{ mm}$	$\sigma = 0,09 \cdot x_f + 0,39$	$\mu = 0,40 \cdot x_f - 10,34$	$A = 0,14 \cdot x_f + 43,03$	$C = \sigma$

Die mathematische Beschreibung dieser drei Größen gibt den Beanspruchungszustand für eine definierte Randbedingung wieder. Die Funktionsgleichung beschreibt die Beanspruchung des Rohrs für eine Zeitdauer von 10 s, bei einem mittleren Abstand zwischen Werkzeug und Rohrwand von 3 mm und für ein Werkzeug mit vier Keilen. Basierend auf diesem Beanspruchungszustand werden nun die Randbedingungen durch die Aufnahme weiterer Variablen in der Funktionsgleichung erweitert und schrittweise das Gesamtmodell aufgebaut.

Die Wirkung der Abstandsänderung auf den Beanspruchungszustand wurde in Abschnitt 5.3 auf zwei Frequenzniveaus (150 Hz und 190 Hz) untersucht. Auf beiden Frequenzniveaus – sowohl für die Beschreibung der Standardabweichung als auch für den Erwartungswert – wurde ein

ähnliches Verhalten festgestellt. Exemplarisch wird die Regressionsfunktion zur Erfassung der Wirkung des Abstands auf die Standardabweichung im Folgenden hergeleitet.

Eine Wechselwirkung zwischen der Frequenz und dem Abstand liegt bei der Standardabweichung und auch bei dem Erwartungswert nicht vor. Die Ergebnisse der Variation des Abstands sind in Tabelle 16 und in Anhang 5 (Tabelle 39) aufgeführt sowie im Abschnitt 5.3.1.5 (vgl. Abbildung 41 Mitte) grafisch dargestellt. Aus diesen Ergebnissen wird zunächst der Effekt berechnet und anschließend dieser in das Gesamtmodell aufgenommen. Hierzu wird eine Mittelwertbildung der Ergebnisse auf beiden Frequenzniveaus für jeden untersuchten Abstand gemäß der Vorgehensweise in Abschnitt 5.3.1 (vgl. Abbildung 35) durchgeführt.

Tabelle 16: Berechnung des Effekts durch Mittelwertbildung auf zwei Frequenzniveaus

Abstand	1	2	3	4
Frequenz 150	7,93	11,45	13,53	12,69
Frequenz 190	12,51	15,40	17,14	18,30
Effekt	10,22	13,43	15,34	15,5

Der daraus ermittelte Effekt ist grafisch in Abbildung 41 Mitte über die Abstandsänderung aufgeführt. Sowohl bei der Standardabweichung als auch beim Erwartungswert kann der Effekt durch eine lineare Regressionsfunktion beschrieben werden. Basierend auf der Methode der kleinsten Quadrate ergeben sich für die lineare Regressionsgleichung zur Beschreibung des Effektes auf die Standardabweichung die beiden Parameter $m_{d\sigma} = 1,77$ und $c_{d\sigma} = 9,18$. Damit ist die lineare Funktion zur Beschreibung des Effektes durch die Abstandsänderung wie folgt aufgebaut:

$$\sigma(x_d) = m_{d\sigma} \cdot x_d + c_{d\sigma}$$

$$m_{d\sigma} = 1,77$$

$$c_{d\sigma} = 9,18$$

Formel 5-10

mit den Parametergrößen:

x_d	Variationsgröße Abstand
$m_{d\sigma}$	Stärke des Einflusses des Abstands
$c_{d\sigma}$	Konstante

Die Verknüpfung dieses Effektes mit dem Effekt der Frequenz aus Tabelle 15 wird über eine lineare Kombination der einzelnen Terme beider Regressionsfunktionen erreicht. Dabei ergibt die Verknüpfung der linearen Einflussgrößen – ohne gegenseitige Wechselwirkung – wiederum

eine lineare Funktion. Die allgemeine Funktionsgleichung lautet hierfür in Abhängigkeit der beiden Parameter Abstand und Frequenz wie folgt:

$$\sigma(x_f, x_d) = m_{f\sigma} \cdot x_f + c_{f\sigma} + m_{d\sigma} \cdot x_d + c_{d\sigma} + k_\sigma \quad \text{Formel 5-11}$$

mit den Parametergrößen:

x_f, x_d	Variationsgrößen Frequenz bzw. Abstand
$m_{f\sigma}, m_{d\sigma}$	Stärke des Einflusses der Frequenz bzw. des Abstands
$c_{f\sigma}, c_{d\sigma}$	Konstanten
k_σ	Korrekturfaktor

Nach dieser Erweiterung des Modells ist eine Anpassung der Gesamtfunktion an einen Messwert erforderlich. Hierzu wird der Funktionswert für einen bestimmten Frequenzwert und einen Abstandswert (z.B. $\sigma(x_f = 150 \text{ Hz}, x_d = 3 \text{ mm}) = 13,66$) ermittelt und mit dem Datenwert aus der Messung verglichen. Der Unterschied wird als ein Korrekturfaktor k_σ in der Gesamtfunktion berücksichtigt. Ausgehend von diesem Wert beschreibt die Funktion die Beanspruchung in Abhängigkeit der ermittelten Effekte der einzelnen Einflussfaktoren. Die Größen $m_{f\sigma}$ und $m_{d\sigma}$ beschreiben dabei die Stärke des Effektes der Frequenz und des Abstands. Die hier beschriebene Vorgehensweise wird auch bei der Erweiterung der Funktionsgleichung durch den Effekt der restlichen Einflussfaktoren angewendet. Es werden hierbei nur die Ergebnisse vorgestellt und auf die Herleitung nicht weiter eingegangen.

Die allgemeine Form der Funktionsgleichung für die Größe des Erwartungswertes ist aufgrund der jeweiligen linearen Einflüsse der Frequenz und des Abstands ähnlich aufgebaut wie die Funktionsgleichung der Standardabweichung:

$$\mu(x_f, x_d) = (m_{f\mu} \cdot x_f + c_{f\mu}) + (m_{d\mu} \cdot x_d + c_{d\mu}) + k_\mu \quad \text{Formel 5-12}$$

mit den Parametergrößen:

x_f, x_d	Variationsgröße Frequenz bzw. Abstand
$m_{f\mu}, m_{d\mu}$	Stärke des Einflusses der Frequenz bzw. des Abstands
$c_{f\mu}, c_{d\mu}$	Konstanten
k_μ	Korrekturfaktor

Die Regressionsanalyse zur Ermittlung des Einflusses des Abstands auf den Erwartungswert hat gemäß Abschnitt 5.3.1.5 eine Stärke von $m_{d\mu} = 65,46$ und die entsprechende Konstante $c_{d\mu} = -3,15$ ergeben. In Tabelle 17 ist die Funktionsgleichung für den Erwartungswert und der Standardabweichung in Abhängigkeit des Abstands und der Frequenz mit den jeweiligen Funktionsparametern aufgeführt. Die verschiedenen Konstanten der Funktionsgleichung sind dabei zusammengefasst angegeben.

Tabelle 17: Beanspruchungszustand in Abhängigkeit der Frequenz und des Abstands

Variationsgröße	Standardabweichung	Erwartungswert
x_f, x_d	$\sigma = 0,09 \cdot x_f + 1,77 \cdot x_d - 4,9$	$\mu = 0,40 \cdot x_f - 3,15 \cdot x_d - 0,9$

Anders als bei der Standardabweichung und dem Erwartungswert wurde bei der Beanspruchungsamplitude eine Wechselwirkung zwischen der Frequenz und dem Abstand festgestellt. Bei einem Abstand $x_d < 3$ mm tritt, wie in Abbildung 41 rechts zu erkennen ist, ein Unterschied bei der Beanspruchungsamplitude zwischen den untersuchten Frequenzen auf. Beim Abstand $x_d > 3$ mm fehlt dieser Einfluss. Dort liegt nur der wechselwirkungsfreie Einfluss des Abstands auf die Beanspruchungsamplitude vor. Es wird daher eine Fallunterscheidung bei dem Abstand $x_d = 3$ mm getroffen, um für den Fall $x_d < 3$ mm, auch die Wechselwirkung des Abstands auf die Beanspruchungsamplitude zu erfassen.

Für den Fall $x_d < 3$ mm muss die Wechselwirkung mit der Frequenz berücksichtigt werden. Die Ursache hierfür wurde erläutert und liegt in der abnehmenden Standardabweichung und der damit abnehmenden Anzahl an Schlagklassen bei kleiner werdendem Abstand. Entsprechend führt dies dazu, dass die jeweilige Schlagklasse eine stärkere Ausprägung zeigt und somit zu einer Vergrößerung der Beanspruchungsamplitude beiträgt. Es ist daher für den zweiten Fall eine Abhängigkeit der Beanspruchungsamplitude von der Standardabweichung erforderlich um die Wechselwirkung im Modell mit aufzunehmen. Diese Beobachtung hat ihre Ursache in der Modellstruktur und kann durch Faktor C berücksichtigt werden. Für einen Wert $C = \sigma$ ist die Beanspruchungsamplitude von der Standardabweichung entkoppelt, sodass dies für den zweiten Fall aufgehoben werden muss. Für den Faktor C ergeben sich damit die zwei neuen Fallunterscheidungen zur korrekten Darstellung der Beanspruchungsamplitude.

$$\text{Fall 1: } x_d \geq 3\text{mm} \rightarrow A(x_d, x_f), C = \sigma$$

$$\text{Fall 2: } x_d < 3\text{mm} \rightarrow A(x_d, x_f), C = 1$$

Formel 5-13

Dadurch, dass die Wechselwirkung zwischen der Frequenz und dem Abstand auf den Faktor C ausgelagert wurde, kann die Funktionsgleichung der Beanspruchungsamplitude durch den Faktor A mithilfe einer Linearkombination der Funktionsgleichungen von der Frequenz und des Abstands erweitert werden. Wie in Abschnitt 5.3.1.5 festgestellt, liegt beim Abstand ein vergleichsweise großer Einfluss vor, der mithilfe einer Potenzfunktion beschrieben werden kann. Die Funktionsgleichung der Potenzfunktion besitzt in diesem Fall die folgende Form:

$$f(x) = m_{dA} \cdot x^{c_{dA}}$$

Formel 5-14

Zur Bestimmung der beiden Parameter m_{dA} und c_{dA} der Funktionsgleichung wird, wie bereits erwähnt, zunächst der Effekt des Abstands mithilfe der Mittelwertbildung aus den Messdaten bestimmt. Anschließend wird der Exponent c_{dA} durch eine Regressionsanalyse aus den Messwerten im vorherigen Abschnitt hergeleitet. Dies ergab für $m_{dA} = 367,2$ sowie $c_{dA} = -1,54$. Zum Schluss wird auch hier ein Korrekturfaktor k_{Ad1} beziehungsweise k_{Ad2} eingeführt, sodass die Funktionsgleichung über einen Vergleich mit den Datenwerten aus der Messung angepasst werden kann. Die Gleichung in Formel 5-15 wird daher mit einem Korrekturfaktor multipliziert. Die Ergebnisse der Funktionsparameter für den Faktor A der Beanspruchungsamplitude sind in Abhängigkeit der Einflussfaktoren Frequenz und Abstand in der nachfolgenden Tabelle 18 inklusive der Korrekturfaktoren zusammengefasst. Für den Korrekturfaktor des Abstands wurden die Werte $k_{dA1} = 2,48$ sowie $k_{dA2} = 44,79$ ermittelt

Tabelle 18: Fallunterscheidung zur Berücksichtigung des Abstands in der Beanspruchungsamplitude

Fall 1: $x_d \geq 3 \text{ mm}$	$A = (0,14 \cdot x_f + 43) \cdot 1/67 \cdot x_d^{-1,54}$	$C = \sigma$
Fall 2: $x_d < 3 \text{ mm}$	$A = (0,14 \cdot x_f + 43) \cdot 1/86 \cdot x_d^{-1,54}$	$C = 1$

5.3.2.2 Einfluss der Keilanzahl des Werkzeugs

Die Verteilung der Beanspruchung auf der Rohrrinnenwand wird maßgeblich durch die Anzahl der Keile des Werkzeugs beeinflusst, während die Intensität der Beanspruchung beziehungsweise der Erwartungswert unabhängig von der Keilanzahl des Werkzeugs ist und durch andere Verfahrensparameter festgelegt wird. Bei der Standardabweichung wurde gemäß Abschnitt 5.3.1 ein Einfluss mit zunehmender Keilanzahl festgestellt. Wie die Ergebnisse der Untersuchungen in Abbildung 44 zeigen, kann der Einfluss mithilfe einer linearen Regressionsfunktion erfasst werden. Die zuvor aufgestellte Regressionsfunktion zur Beschreibung der Standardabweichung erweitert sich damit um einen linearen Term und ist nun wie folgt aufgebaut:

$$\sigma(x_f, x_d, x_k) = (m_{f\sigma} \cdot x_f + c_{f\sigma}) + (m_{d\sigma} \cdot x_d + c_{d\sigma}) + (m_{k\sigma} \cdot x_k + c_{k\sigma}) + k_{\sigma} \quad \text{Formel 5-15}$$

mit den Parametergrößen:

x_f, x_d, x_k	Variationsgrößen Frequenz, Abstand und Keilanzahl
$m_{f\sigma}, m_{d\sigma}, m_{k\sigma}$	Stärke des Einflusses der Frequenz, des Abstands und der Keilanzahl
$c_{f\sigma}, c_{d\sigma}, c_{k\sigma}$	Konstanten der Funktionsgleichung Frequenz, Abstand und Keilanzahl
k_{σ}	Korrekturfaktor

Zunächst wird der Effekt der Keilanzahl ermittelt und anschließend über eine Regressionsanalyse der Einfluss erfasst. Für die Parameter $m_{k\sigma}$ und $c_{k\sigma}$ wurde ein Wert von 0,21 und 14,58 bestimmt.

Die Auswertungen in Abschnitt 5.3.2 haben aufgezeigt, dass die Keilanzahl einen starken Einfluss auf die Beanspruchungsamplitude besitzt. Die Verteilung der Beanspruchung auf einen größeren Bereich im Rohr mit zunehmender Keilanzahl ist mit einem Abfall der Beanspruchung pro Kante des Werkzeugs verbunden. Ähnlich wie zuvor bei dem Einfluss des Abstands, kann auch hier der starke Abfall der Beanspruchungsamplitude durch eine Potenzfunktion beschrieben werden. Unter Einbeziehung der Fallunterscheidung von Abschnitt 5.3.2.1 kann der Effekt mittels des Produktansatzes berücksichtigt werden. Die Gesamtfunktionsgleichung der Beanspruchung setzt sich dabei aus dem Produkt der jeweiligen Einflüsse der Frequenz, des Abstands und der Keilanzahl zusammen. Der Einfluss der Keilanzahl wird durch die beiden Faktoren $m_{kA} = 197,76$ und dem Exponenten $c_{kA} = -0,90$ bestimmt. Für die Anpassung der Gesamtgleichung an die Messwerte werden über einen Vergleich mit der Messung die Werte für die Korrekturfaktoren k_{kA1} und k_{kA2} ermittelt. Nachfolgend ist die allgemeine Form der Gesamtgleichung des Faktors A aufgeführt. Dabei wurden die jeweiligen Korrekturfaktoren $k_{dA1\&2}$ und $k_{kA1\&2}$ zu einem Gesamtkorrekturfaktor k_{A1} beziehungsweise k_{A2} zusammengefasst. Die jeweiligen Funktionsparameter der Formel 5-17 sind im Abschnitt 5.4 zusammenfassend aufgeführt.

$$\begin{aligned} \text{Fall 1: } A(x_f, x_d, x_k) &= (m_{fA} \cdot x_f + c_{fA}) \cdot (m_{dA} \cdot x_d^{c_{dA}}) \cdot (m_{kA} \cdot x_k^{c_{kA}}) \cdot k_{A1} \\ \text{Fall 2: } A(x_f, x_d, x_k) &= (m_{fA} \cdot x_f + c_{fA}) \cdot (m_{dA} \cdot x_d^{c_{dA}}) \cdot (m_{kA} \cdot x_k^{c_{kA}}) \cdot k_{A2} \end{aligned} \quad \text{Formel 5-16}$$

mit den Parametergrößen:

x_f, x_d, x_k	Variationsgrößen Frequenz, Abstand und Keilanzahl
m_{fA}, m_{dA}, m_{kA}	Konstante der Frequenz, des Abstands und der Keilanzahl
c_{dA}, c_{kA}	Formfaktor der Funktionsgleichung Frequenz, Abstand und Keilanzahl
$c_{d1}, c_{d1},$	Konstanten
k_{A1}, k_{A2}	Korrekturfaktoren

5.3.2.3 Einfluss der Beanspruchungszeit

Als letzter Einflussfaktor wird die Beanspruchungszeit des Werkzeugs im Rohr in das Gesamtmodell aufgenommen. Die Beanspruchungszeit beeinflusst, wie bereits in Abschnitt 5.3.1.2 festgestellt, nur die Beanspruchungsamplitude beziehungsweise die Schlaghäufigkeit. Die Standardabweichung und der Erwartungswert sind dabei unabhängig von der Beanspruchungszeit. Die Stärke des linearen Einflusses auf die Beanspruchungsamplitude beträgt dabei $m_{tA} = 6,03$. Die zugehörige Regressionskonstante $c_{tA} = -2,99$ wird nachfolgend

nicht berücksichtigt, da die Funktionsgleichung des Faktors A durch die Korrekturfaktoren an die Messung angepasst wird. Dadurch erweitert sich $k_{A1\&2}$ mit dem Faktor $k_{tA1\&2}$. Die allgemeine Funktionsgleichung zur Beschreibung des Faktors A lautet daher wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Fall1: } A(x_f, x_d, x_k, x_t) &= (m_{fA} \cdot x_f + c_{fA}) \cdot (m_{dA} \cdot x_d^{c_{dA}}) \cdot (m_{kA} \cdot x_k^{c_{kA}}) \cdot (m_{tA} \cdot x_t) \cdot k_{A1} \\ \text{Fall2: } A(x_f, x_d, x_k, x_t) &= (m_{fA} \cdot x_f + c_{fA}) \cdot (m_{dA} \cdot x_d^{c_{dA}}) \cdot (m_{kA} \cdot x_k^{c_{kA}}) \cdot (m_{tA} \cdot x_t) \cdot k_{A2} \end{aligned} \quad \text{Formel 5-17}$$

mit den Parametergrößen:

x_f, x_d, x_k, x_t	Variationsgrößen Zeit, Abstand, Keilanzahl, Frequenz
$m_{fA}, m_{dA}, m_{kA}, m_{tA}$	Konstante der Frequenz, des Abstands, der Keilanzahl und der Zeit
c_{dA}, c_{kA}	Formfaktoren der Funktionsgleichung Abstand und Keilanzahl
c_{A1}, c_{A2}	Konstanten
k_{f1}, k_{tA}	Korrekturfaktor

5.4 Fazit zur Modellbildung der Beanspruchung

Zu Beginn dieses Kapitels wurden die Grundlagen eines Modells entwickelt, das basierend auf den drei Größen Erwartungswert, Beanspruchungsamplitude sowie Standardabweichung die Beanspruchung eines Rohrs durch die Schlagwirkung für das Schlagverfahren wiedergibt. Aufbauend darauf wurde in experimentellen Untersuchungen der Einfluss von verschiedenen Faktoren des Verfahrens auf die Beanspruchung des Rohrs untersucht. Die vom Werkzeug übertragene Beanspruchung wurde anhand der drei Größen Schlagintensität, Schlaghäufigkeit und Schlagrichtung experimentell bestimmt. Dabei wurde festgestellt, dass die experimentell ermittelte Beanspruchung mithilfe einer Normalverteilung und den drei Größen des Modells beschrieben werden kann. Es wurden dann die Einzelwirkungen der relevanten Einflussfaktoren auf die drei Größen des Modells mathematisch erfasst und schrittweise zu einem Gesamtmodell zusammengefügt. Die Modellstruktur ist in der nachfolgenden Abbildung 46 zusammenfassend und in Abhängigkeit der Parametergrößen dargestellt. Das Modell beschreibt die Abhängigkeiten der Beanspruchungsgrößen von den Parametergrößen. Dabei gibt das Beanspruchungsmodell durch die Funktion $f(x)$ den Verlauf der Schlaghäufigkeit über die Schlagintensität x für eine Kante eines keilförmigen Werkzeugs wieder. Die Schlagintensität wird dabei in Prozent angegeben, wobei eine Schlagintensität von 100 % einer Kraft von 7.500 N entspricht. Das Modell basiert auf der Tatsache, dass die Schlagverteilung an der Rohrwand aufgrund der Schlagwirkung eines Werkzeugs mit symmetrischer Keilanordnung einer Normalverteilung folgt. Dabei gibt das Beanspruchungsmodell die Schlagverteilung für eine Kante dieses Werkzeugs wieder. Für die restlichen Kanten ergibt sich im Mittel ein gleicher Schlagverlauf. Das Beanspruchungsmodell berücksichtigt dabei den Einfluss der Variablen Frequenz x_f des

Werkzeugträgers, der Keilanzahl x_d des Werkzeugs, des Abstands zwischen Werkzeug und Rohrrinnenwand x_d sowie der Beanspruchungszeit x_t .

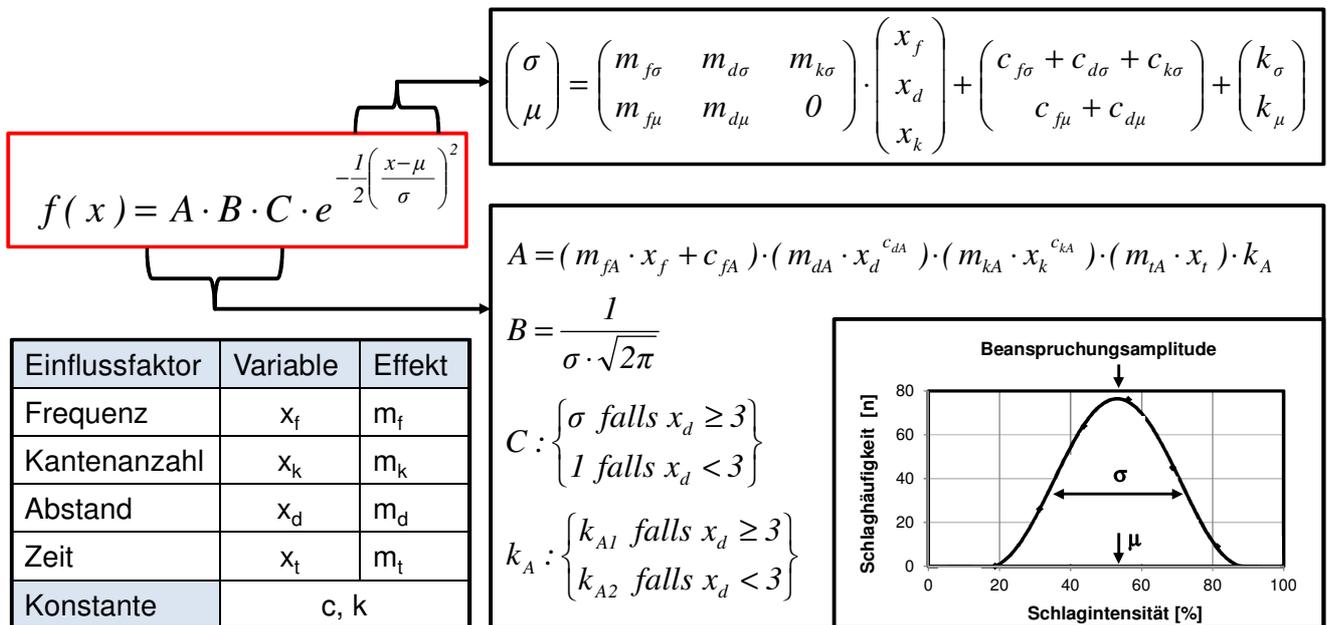


Abbildung 46: Gesamtmodell zur Beschreibung des Beanspruchungszustandes im Rohr

Der grundlegende Aufbau des Modells ist in Abbildung 46 rot umrandet. Es setzt sich aus den Größen A, B, C sowie der Standardabweichung σ und dem Erwartungswert μ zusammen. Diese Größen werden zudem durch die Variablen Frequenz x_f , Kantenanzahl x_k , Abstand x_d sowie Beanspruchungszeit x_t beeinflusst. Die genaue Wirkung und der Effekt dieser Parameter wurden im Rahmen der experimentellen Untersuchungen, unter den Randbedingungen dieser Arbeit, ermittelt. Zusammengefasst sind diese Ergebnisse in den nachfolgenden Tabellen aufgeführt. Dabei wird zwischen der Stärke eines Einflusses (m), Konstanten (c) und Korrekturfaktoren (k) unterschieden. Die Stärke des Einflusses der einzelnen Parameter auf die Beanspruchungsfaktoren wurde im Rahmen der experimentellen Untersuchungen hergeleitet. Dabei hat sich ergeben, dass die Wirkungen der Parameter basierend auf einer linearen Funktion oder basierend auf einer Potenzfunktion mathematisch beschrieben werden können. Die einzelnen Parameterwerte dieser Funktionen sind in der Tabelle 19 zusammengefasst:

Tabelle 19: Stärke der einzelnen Parameter auf die Beanspruchungsgrößen

	Frequenz	Kantenanzahl	Abstand	Zeit
Standardabweichung σ	$m_{f\sigma} = 0,092$	$m_{k\sigma} = 0,21$	$m_{d\sigma} = 1,77$	-
Mittelwert μ	$m_{f\mu} = 0,40$	-	$m_{d\mu} = -3,15$	-
Faktor A	$m_{fA} = 0,14$	$m_{kA} = 197,76$	$m_{dA} = 367,42$	$m_{tA} = 6,03$

Des Weiteren sind die zugehörigen Konstanten dieser Funktionen in Tabelle 20 aufgeführt:

Tabelle 20: Konstanten der Beanspruchungsparameter

	Frequenz	Kantenanzahl	Abstand	Zeit
Standardabweichung σ	$c_{f\sigma} = 0,39$	$c_{k\sigma} = 14,58$	$c_{d\sigma} = 9,18$	-
Mittelwert μ	$c_{f\mu} = -10,34$	$c_{kA} = -0,898$	$c_{d\mu} = 65,46$	-
Faktor A	$c_{fA} = 43,03$	-	$c_{dA} = -1,54$	-

Bei der Zusammenführung der Einzelwirkungen in ein Gesamtmodell ist jeweils ein Abgleich der Gesamtfunktion mit experimentellen Daten erforderlich. Der sich ergebende Unterschied zwischen Modell und Experiment wurde dabei im Modell durch Korrekturfaktoren, die in Tabelle 21 angegeben sind, angeglichen.

Tabelle 21: Korrekturfaktoren für die Beanspruchungsparameter

		Korrekturfaktor
Standardabweichung σ	k_{σ}	-29,91
Erwartungswert μ	k_{μ}	-56,02
Faktor A falls ($x_d \geq 3$)	k_{A1}	1/94198
Faktor A falls ($x_d \leq 3$)	k_{A2}	1/6618

Das Modell ermöglicht damit eine qualitative und quantitative Aussage der komplexen Beanspruchung des Rohrs durch die Angabe der Intensität, der Höhe sowie der Richtung der Beanspruchung. Die Beanspruchung in Abhängigkeit der Einflussfaktoren kann quantitativ erklärt werden. Mithilfe des Modells kann nun untersucht werden, wie sich der Beanspruchungszustand bei der Veränderung der Parameter außerhalb der untersuchten Grenzen verhält. Daraus können zur besseren Veranschaulichung mehrdimensionale Diagramme des Beanspruchungszustands abgeleitet werden.

Die Basisgröße des Beanspruchungsmodells stellt die Schlagkraft dar, die gemäß Abschnitt 2.3.1 eine wichtige Größe für die Bewertung des Abtrags darstellt. Des Weiteren korreliert, wie in Abschnitt 5.2.2 erläutert, die Schlagkraft aus dem Beanspruchungsmodell mit der kinetischen Anfangsenergie des Werkzeugs beim Aufschlag. Damit stehen von den Randbedingungen des Versuchsstands unabhängige Größen zur Verfügung, die eine Bewertung des Abtrags in Abhängigkeit der festigkeitsrelevanten Eigenschaften der Ablagerungen ermöglichen. Die Beziehung zwischen der Schlagkraft beziehungsweise der Schlagintensität und der Aufprallgeschwindigkeit wurde bereits in Formel 5-7 gezeigt. In der nachfolgenden Abbildung

47 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt. Aus dem Kraftverlauf kann der Kraftstoß für die unterschiedlichen Schlagintensitäten berechnet werden und daraus schließlich die Geschwindigkeit beim Schlag. Aufgrund der linearen Beziehung zwischen der Schlagintensität und der Geschwindigkeit kann daher aus den Ergebnissen des Beanspruchungsmodells direkt die kinetische Anfangsenergie beim Schlag auf der Rohrrinnenfläche in Abhängigkeit der Einflussfaktoren ermittelt werden.

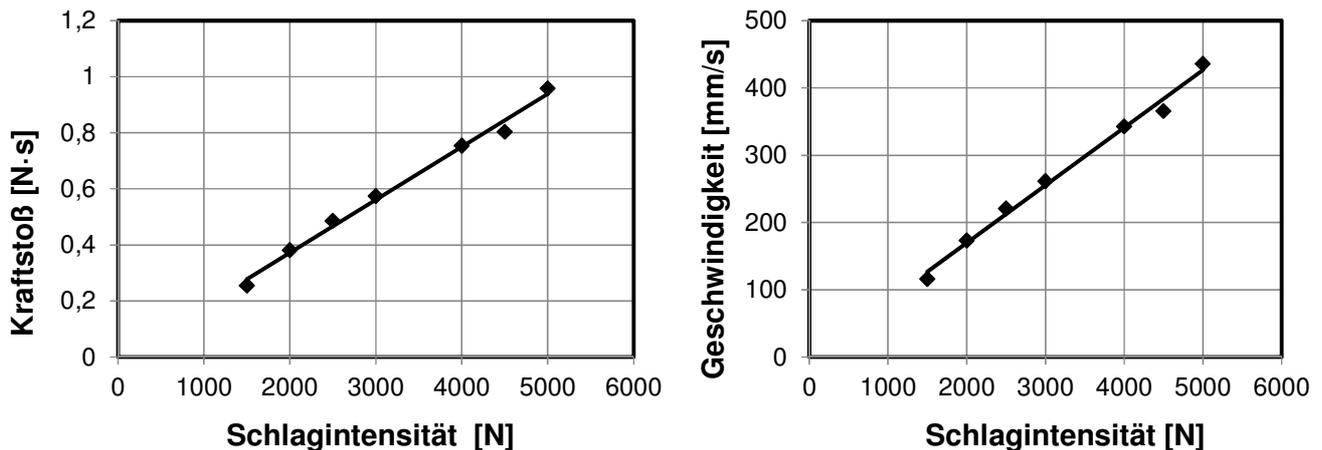


Abbildung 47: Beziehung zwischen Schlagintensität und Kraftstoß und Geschwindigkeit beim Schlag

5.4.1 Überprüfung der Modellgüte

Zur Überprüfung der Modellgüte wird nachfolgend die vom Modell prognostizierte Beanspruchung mit experimentellen Werten verglichen. Hierzu werden die mathematischen Gleichungen des vorherigen Abschnitts in einem Simulationsmodell mithilfe der Software Matlab umgesetzt, sodass der Beanspruchungszustand für verschiedene Parametervariationen simuliert werden kann. Unter Angabe der jeweiligen Einflussfaktoren Frequenz, Kantenanzahl, Beanspruchungszeit und des Abstands soll die grafische Darstellung des Beanspruchungszustandes für eine Werkzeugkante erfolgen. Um die Ergebnisse aus dieser Simulation mit den experimentellen Daten zu überprüfen, wurde für unterschiedliche Parameterkombinationen der jeweilige Beanspruchungszustand simuliert und den Ergebnissen aus den experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt. Zur Überprüfung der Modellgüte wurde die mittlere Abweichung B definiert. Diese Größe untersucht die Abweichung des Modells vom Experiment an definierten Stellen des Beanspruchungsverlaufs. Die jeweiligen Abweichungen werden durch das Multiplizieren mit den Werten der Schlaghäufigkeit gewichtet. Damit ist sichergestellt, dass die Abweichungen entsprechend ihrer Wichtigkeit im Beanspruchungsverlauf berücksichtigt werden. Anschließend wird die Summe aus den relativen Abweichungen gebildet und durch die Gesamtschlagzahl dividiert. Der sich damit ergebende

Wert entspricht einer mittleren Abweichung des simulierten Beanspruchungszustandes von den experimentell erfassten Daten. Damit steht eine Größe zur Bewertung der Modellgüte zur Verfügung.

Die Anzahl und die Position der entsprechenden Überprüfungsstellen wurden in Anlehnung der in Abschnitt 5.2 definierten Schlagklassen festgelegt. Die Bestimmung der Abweichung B erfolgt mithilfe der Formel 5-18.

$$B_a = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} \left(100 - \left(\frac{x_i}{r_i}\right) \cdot 100\right) \cdot x_i}{S} \quad \text{Formel 5-18}$$

mit den Parametergrößen:

B_a	Mittlere Abweichung in Prozent
x_i	Prognosewert aus Simulation an der Stelle i
r_i	Schlaghäufigkeit an der Stelle i aus Messwerten
n_i, i	Schlagklasse
S	Schlagzahl

Da das Gesamtmodell aus den einzelnen Regressionsmodellen zusammengesetzt ist, ist die Modellgüte von der Genauigkeit der einzelnen Teilmodelle stark abhängig. Die jeweiligen Einflüsse wurden durch Mittelwertbildung und Regressionsanalysen erfasst, sodass das Ziel der Modellbildung nie die Erfassung der exakten Werte war, sondern die Erfassung der jeweiligen Beziehungen und Einflüsse sowie der Effekte der relevanten Faktoren untereinander. Entsprechend sind nachfolgende Abweichungen zwischen der Simulation und dem Experiment zu erwarten, weil auch die Datenbasis des gesamten Modells zufalls- und wahrscheinlichkeitsbasierend aufgestellt wurde. Daher sollen die nachfolgenden Ergebnisse als ein rein qualitativer Vergleich des Experiments mit der Simulation verstanden werden. Die für das Verständnis des Verfahrens weitaus wichtigeren Einflüsse sind im Modell berücksichtigt.

In den nachfolgenden Abbildungen ist eine Gegenüberstellung der Simulation und des Experiments für unterschiedliche Parameterkombinationen dargestellt. Für ein Werkzeug mit vier Keilen wurde die Beanspruchung des Rohrs für die beiden Frequenzen 118 Hz und 190 Hz sowie für ein Werkzeug mit acht Keilen für die Frequenzen 150 Hz und 180 Hz simuliert. Die Ergebnisse in Abbildung 48 zeigen für das Werkzeug mit vier Keilen eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Werten an. Die mittlere Abweichung zwischen Modell und Experiment liegt bei dem Werkzeug mit vier Kanten deutlich unter 10 %. Da die meisten Untersuchungen an einem Werkzeug mit vier Keilen durchgeführt wurden und das Modell basierend auf diesem

Werkzeug aufgestellt wurde, fällt die Prognose der Beanspruchung entsprechend gut aus. Auch für weitere Frequenzen dieses Werkzeugs wurde eine hohe Modellgüte erreicht.

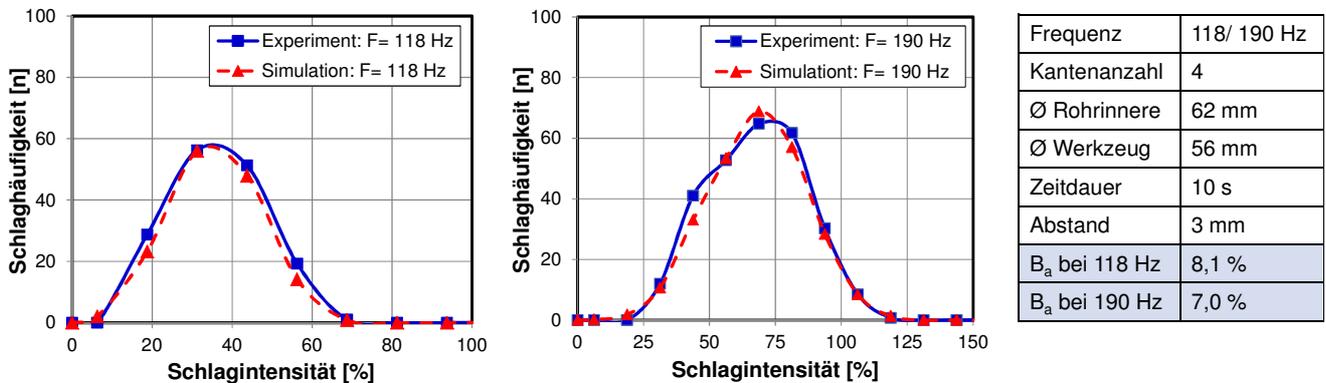


Abbildung 48: Beanspruchungszustand für ein Werkzeug mit vier Kanten und unterschiedlichen Frequenzen

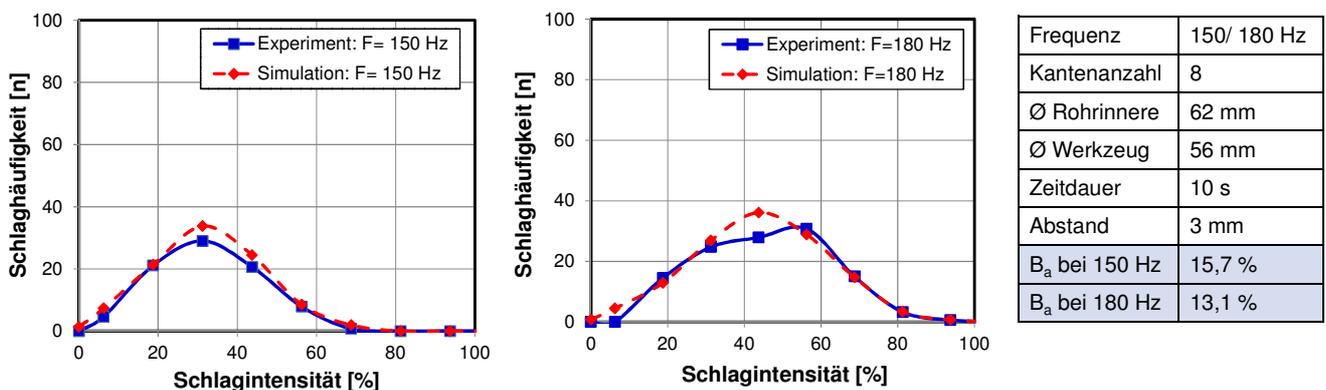


Abbildung 49: Beanspruchungszustand für ein Werkzeug mit acht Kanten und unterschiedlichen Frequenzen

Die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment sind wegen der oben genannten Ursache für ein Werkzeug mit acht Kanten größer. Die mittlere Abweichung beträgt für die beiden Frequenzen 150 Hz und 180 Hz circa 15,7 % und 13,1 %.

In Abbildung 50 sind die Ergebnisse der Beanspruchung für einen Abstand $d_A = 1$ mm und $d_A = 4$ mm zwischen Werkzeug und Rohrinnefläche dargestellt. Es ist zu erwarten, dass mit zunehmendem Abstand die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment größer werden. Der größer werdende Abstand führt zu einer zunehmend geringeren Schlagbeanspruchung der Rohrinnefläche, wodurch der Beanspruchungszustand unregelmäßig ausfällt. Hauptsächlich liegt dies in dem begrenzten Wirkungsbereich des Werkzeugträgers begründet. Wie gezeigt, nimmt die Schlagintensität und damit auch die Kontakthäufigkeit aufgrund der begrenzten Auslenkung des Werkzeugträgers stark ab, bis auf der Rohrinnefläche kein Kontakt mehr festgestellt

werden kann. Bei dem eingesetzten Werkzeugträger liegt die Grenze bei circa 5 – 6 mm, ab der keine Schlagbeanspruchung mehr festgestellt werden kann. Diese Grenze definiert den Wirkungsbereich des Werkzeugträgers und hängt neben der Frequenz auch stark von den Einspannungsrandbedingungen beziehungsweise der Steifigkeit der Werkzeugträgerbefestigung ab. Dieser Zusammenhang wurde in Abbildung 42 links aufgezeigt. Entsprechend zeigen die Ergebnisse in Abbildung 50, dass bei einem Abstand von 1 mm eine geringe Abweichung von circa 8,1 % auftritt und bei 4 mm die Abweichungen größer werden und bei circa 11,0 % liegen.

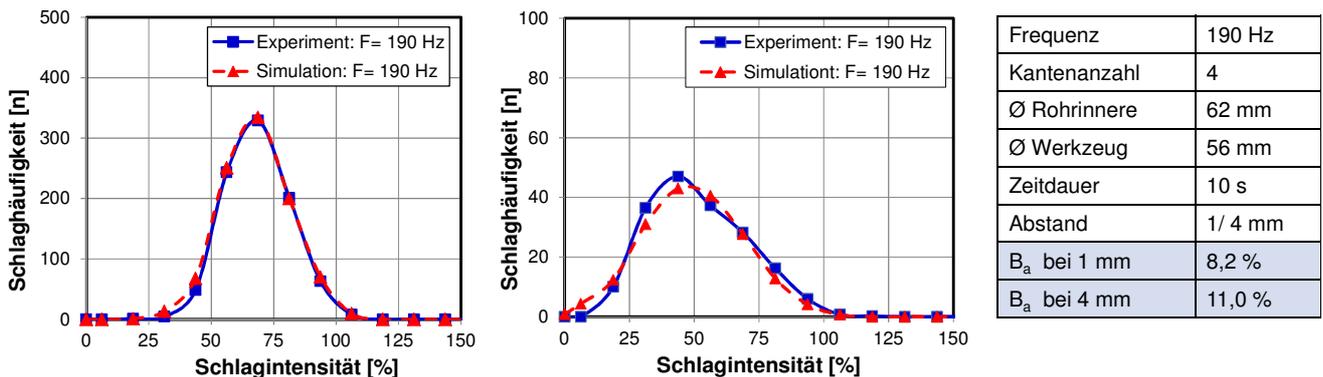


Abbildung 50: Beanspruchungszustand für einen Abstand von 1 mm (links) und 4 mm (rechts)

Als nächstes wurde die Abweichung der Einflussgröße Beanspruchungszeit zwischen der Simulation und dem Experiment ermittelt. Die Änderung der Beanspruchungszeit hat einen linearen Einfluss auf den Beanspruchungszustand. Daher konnte dieser Einfluss mathematisch gut erfasst werden. Die Ergebnisse in Abbildung 51 zeigen eine Abweichung von circa 9,9 % beziehungsweise 8,4 % bei einer Beanspruchungszeit von 20 s beziehungsweise 30 s.

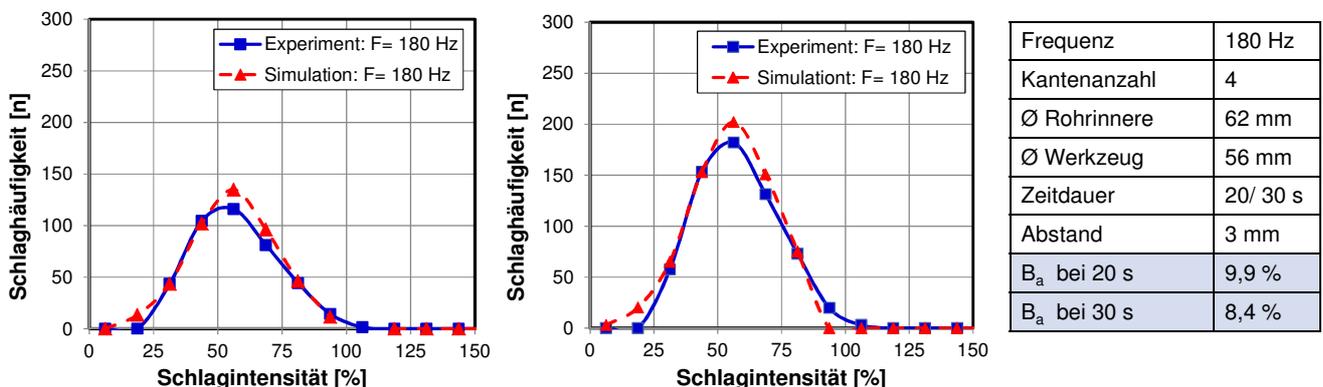


Abbildung 51: Beanspruchung für eine Zeitdauer von 20 s (links) und 30 s (rechts)

Die Überprüfung der Modellgüte hat insgesamt gezeigt, dass die Beanspruchung durch das Gesamtmodell gut prognostiziert werden kann. Die Abweichungen liegen in der Größenordnung

von 10 %. Größere Abweichungen treten vor allem dort auf, wo die experimentelle Datenbasis ungenaue Werte aufgrund von Verfahrensgrenzen geliefert hat. Der Effekt und der Einfluss der relevanten Faktoren sind jedoch vollständig erfasst. Das Modell kann daher für weitere Untersuchungen wichtige Erkenntnisse über den Einfluss der wichtigen Faktoren auf die Beanspruchung liefern. Zur Veranschaulichung der Einflussmöglichkeit der verschiedenen Faktoren wird im folgenden Abschnitt der Beanspruchungszustand für verschiedene Parameterkombinationen simuliert.

5.4.2 Möglichkeiten zur Beeinflussung der Beanspruchung

Nachfolgend soll die Beanspruchung eines Rohrs mit einem realitätsnahen Modell eines Werkzeugs in Abhängigkeit der Einflussfaktoren diskutiert werden. Hierzu wird ein Rohr mit dem Innendurchmesser $D_1 = 62 \text{ mm}$ und ein Werkzeug mit 16 Keilen betrachtet. Das Beanspruchungsmodell bietet verschiedene Möglichkeiten, um die Beanspruchung im Rohr zu verändern. In Abbildung 52 ist der Beanspruchungszustand für eine Werkzeugkante und für eine Beanspruchungszeit von $t = 10 \text{ s}$ in Abhängigkeit der Frequenz des Werkzeugträgers dargestellt.

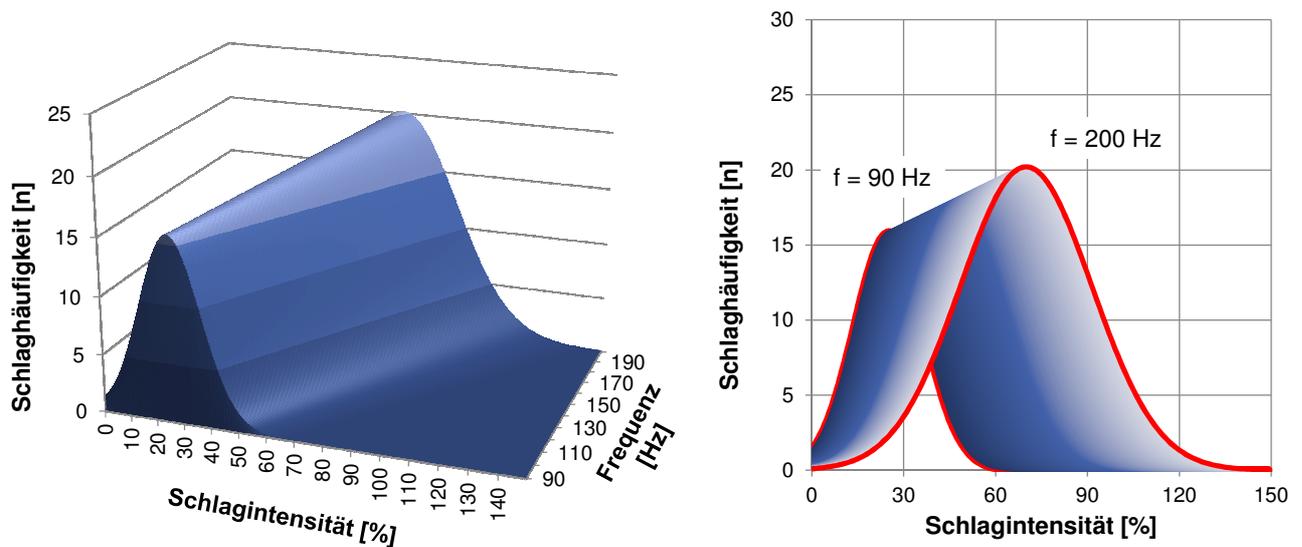


Abbildung 52: Beanspruchung durch ein Werkzeug mit 16 Kanten und einen Abstand von 3 mm in Abhängigkeit unterschiedlicher Frequenzen

Der Einflussfaktor Frequenz ändert die Schlagintensität im Rohr und kann, wenn auch nur begrenzt, zu einer bedarfsgerechten Anpassung der Schlagintensität beitragen. Aufgrund der wachsenden Standardabweichung mit größer werdender Frequenz ist die Genauigkeit der benötigten Schlagintensität nur bedingt einstellbar. In dem dargestellten Frequenzbereich zwischen $F = 90 \text{ Hz}$ und $F = 200 \text{ Hz}$ ist gut zu erkennen, dass die relative Schlaghäufigkeit mit steigender Frequenz erhöht wird. Damit verbunden ist der Anstieg der Gesamtschlagzahl der

Beanspruchung. Die Frequenz stellt somit zwar eine einfache, aber auch eine grobe Möglichkeit dar, um die Beanspruchung zu verändern. Nachteilig wirkt sich die Erhöhung der Frequenz auf den Verschleiß und auf die Wärmeentwicklung des Werkzeugträgers aus. Daher sollte die Frequenz nicht die erste Wahl zur Beeinflussung des Beanspruchungszustandes darstellen.

Eine weitere Beeinflussungsmöglichkeit ist durch den Abstand der Werkzeugkante zur Rohrrinnenfläche gegeben. Wird bei gleichen Randbedingungen der Abstand durch eine Erhöhung des Werkzeugdurchmessers von 3 mm auf 2 mm verkleinert, so wird die Standardabweichung deutlich geringer und infolgedessen die relative Schlaghäufigkeit vergrößert. Die Beanspruchung setzt sich nun aus zunehmend ähnlich werdenden Schlagintensitäten zusammen. Bei einem kleinen Abstand sind die Kontaktwahrscheinlichkeiten des Werkzeugs mit der Rohrrinnenwand, wie bereits im vorherigen Abschnitt diskutiert, deutlich größer. Daher kommt es gleichzeitig zu einer Erhöhung der Gesamtschlagzahl. Die Abstandsänderung stellt damit eine wesentlich effektivere Möglichkeit zur Erhöhung der Schlaghäufigkeit und zur Beeinflussung der Beanspruchung dar. Diese Art der Beanspruchung eignet sich vor allem für harte und spröde Ablagerungen, die eine hohe Schlagintensität für die Herbeiführung eines Bruchs benötigen. Zusätzlich dazu kann die Schlagintensität durch die Frequenz erhöht werden. Hier zeigt sich, dass die Standardabweichung vergrößert und damit die relative Schlaghäufigkeit verringert wird, obwohl die Gesamtschlagzahl zunimmt.

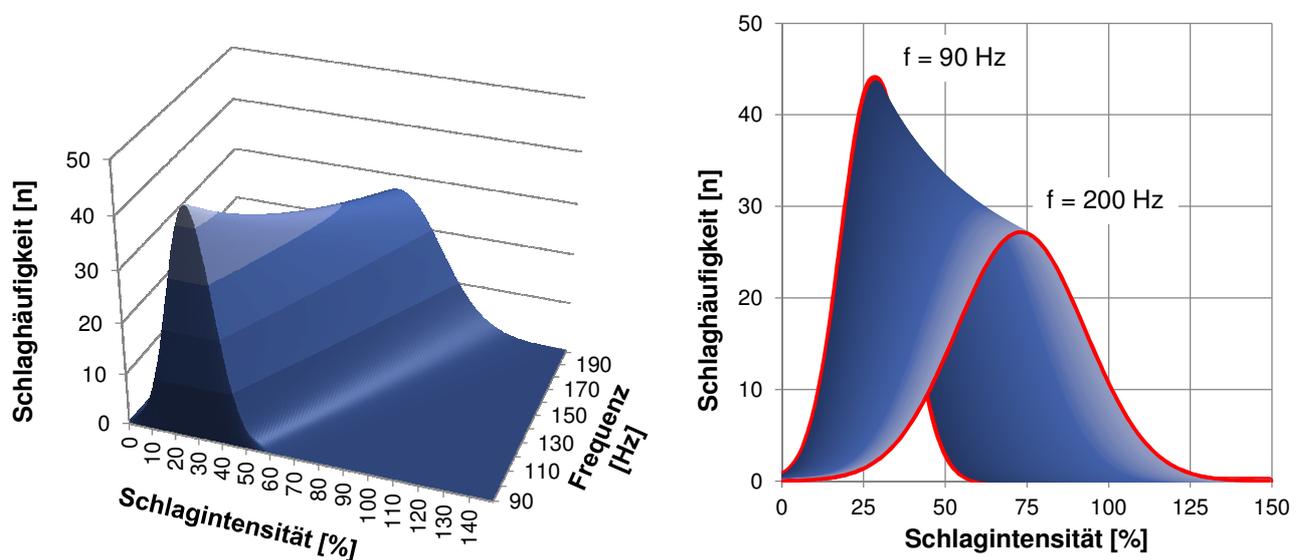


Abbildung 53: Beanspruchung durch ein Werkzeug mit 16 Kanten und einen Abstand von 2 mm in Abhängigkeit unterschiedlicher Frequenzen

In der Regel ist die notwendige Höhe der Beanspruchung für eine Anwendungsaufgabe unbekannt. Es müssen daher Kenngrößen ermittelt werden, die Aussagen darüber liefern, bei

welcher Art und Intensität der Beanspruchung ein Abtrag beziehungsweise ein Bruch in den Ablagerungen erzeugt werden kann. Einen Anhaltspunkt für die notwendige Höhe und Intensität der Beanspruchung liefern mechanische Kennwerte der Ablagerungen wie zum Beispiel die Festigkeit. Neben einer rein theoretischen Betrachtung der notwendigen Beanspruchung sind experimentelle Abtragversuche unabdingbar, um die genaue Intensität des Beanspruchungsbedarfs zu klären. Ist die Intensität der notwendigen Beanspruchung festgelegt, so können mithilfe des Beanspruchungsmodells die notwendigen Parametereinstellungen des Verfahrens ermittelt werden, um die erforderliche Intensität der Beanspruchung für die Anwendungsaufgabe bereitzustellen. Die Höhe der Abtragleistung hängt dann von der Verteilung dieser Beanspruchung auf der Rohrrinnenwand ab. Diese kann zum einen durch die Kantenanzahl des Werkzeugs und zum anderen durch die freie Drehung des Werkzeugträgers beeinflusst werden. Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor zur Übertragung einer gleichmäßigen Beanspruchung auf die Rohrrinnenwand stellt die Beanspruchungszeit dar. Eine ausreichend hohe Beanspruchungszeit ist erforderlich, damit das Werkzeug die erforderliche Beanspruchung auf die gesamte Rohrrinnenfläche übertragen kann. Die Beeinflussung der Beanspruchungszeit wird durch den Vorschub des Werkzeugträgers gesteuert. In Abbildung 54 ist der Einfluss der Beanspruchungszeit deutlich zu erkennen.

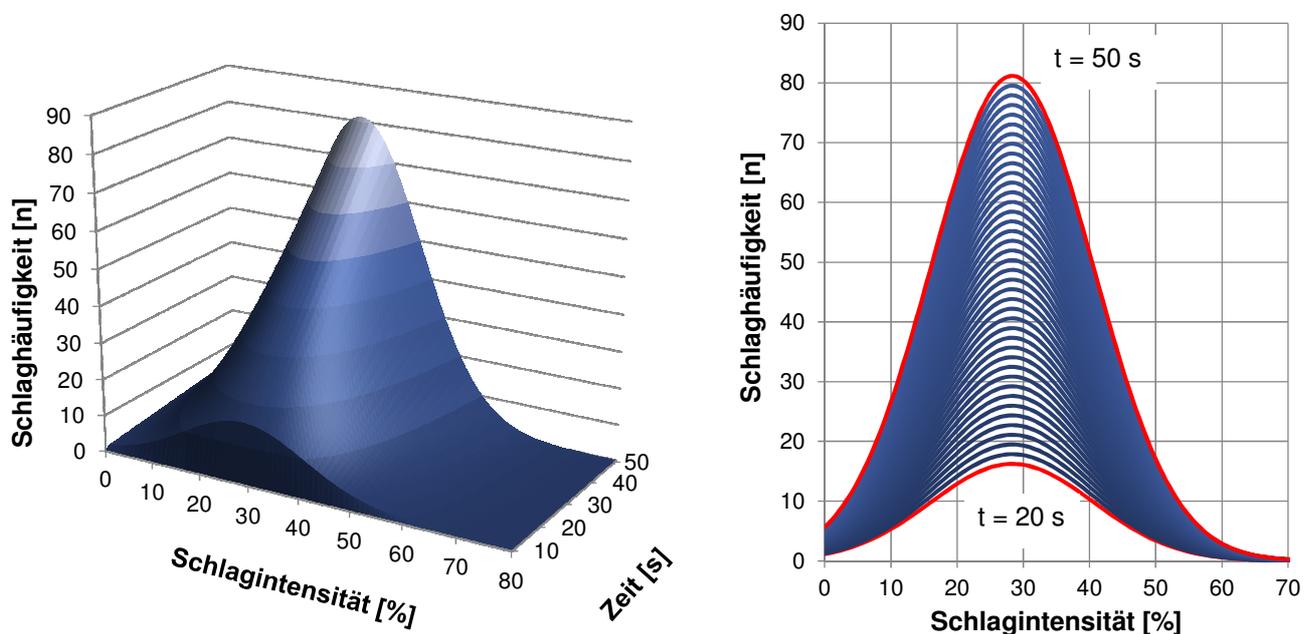


Abbildung 54: Beanspruchung durch ein Werkzeug mit 16 Kanten, einer Frequenz von 100 Hz und einen Abstand von 2 mm in Abhängigkeit von einer unterschiedlichen Beanspruchungszeit

Wie bereits erwähnt, ändert die Beanspruchungszeit lediglich die Häufigkeit der jeweiligen Schlagintensitäten. Ist die notwendige Beanspruchungsintensität einer Anwendung bekannt, so

hängt die erforderliche Beanspruchungszeit im Wesentlichen von der Dicke der Ablagerung ab. Die zur Erzeugung dieser Beanspruchung erforderliche Zeitdauer beziehungsweise der erforderliche Vorschub des Verfahrens kann dann aus dem Beanspruchungsmodell ermittelt werden. Durch die Anzahl der Kanten des Werkzeugs kann die Verteilung der Beanspruchung auf die Rohinnenfläche gesteuert werden. Die Auswahl dieser Größe hängt sehr stark von den Eigenschaften und dem Bruchverhalten der Ablagerungen ab, die den Wirkungsbereich einer Kante festlegen. Das Beanspruchungsmodell liefert hierfür Aussagen über die Abhängigkeit der Beanspruchung von der Kantenzahl. Die sich bei einer Beanspruchung ergebende Abtragleistung hängt dabei von den Eigenschaften der Ablagerungen ab. Um die Abtragleistung und das Abtragverhalten näher zu untersuchen, werden im nächsten Kapitel experimentelle Untersuchungen an definierten Ablagerungen durchgeführt. Ziel ist dabei, die ermittelten Erkenntnisse über die Einflussfaktoren zu überprüfen und zu zeigen, dass der durch das Modell definierte Beanspruchungszustand die Ablagerungen gezielt entfernt.

6 Experimentelle Untersuchung des Abtragverhaltens

In den bisher durchgeführten Untersuchungen wurden die Randbedingungen und die Eigenschaften des Schlagverfahrens definiert. Darauf aufbauend wurde die Beanspruchung des Rohrs durch das Bearbeitungswerkzeug mithilfe des Beanspruchungsmodells erfasst. In diesem Kapitel werden Versuche an Rohren mit Ablagerungen beschrieben, um den Abtragvorgang durch das Schlagverfahren näher untersuchen zu können. Dies soll zum einen dazu dienen, die Effektivität des Schlagverfahrens nachzuweisen. Zum anderen sollen die Wirkungen der einzelnen Faktoren auf das Abtragverhalten ermittelt werden. Hierzu ist es notwendig, dass die Versuche unter definierten Randbedingungen durchgeführt werden können. Eine systematische Untersuchung des Abtragverhaltens ist mit natürlich gebildeten Ablagerungen jedoch nicht durchführbar, da solche Ablagerungen, wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, zum einen förderstellenabhängige Eigenschaften besitzen und zum anderen der Aufbau und die Zusammensetzung der Ablagerungen auch innerhalb eines Rohrs variieren können. Entsprechend ist es unmöglich, Rohre mit Ablagerungen zu finden, deren Aufbau und Eigenschaften die notwendigen Ähnlichkeiten aufweisen, um eine reproduzierbare Untersuchung des Verfahrens durchzuführen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Rohrablagerungen aus der Erdgas- und Erdölförderung radioaktiv kontaminiert sind und die Untersuchungen des Abtragverhaltens nur unter strengen strahlenschutztechnischen Sicherheitsvorkehrungen durchgeführt werden können. Dadurch ist eine wichtige Voraussetzung für eine im großen Maßstab durchzuführende Untersuchung, nämlich die einfache und effiziente Handhabung, nicht gegeben. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher zunächst nach einem geeigneten und nicht gefährlichen Modellstoff gesucht, mit dem dann die Ablagerungen in Rohren nachgebildet werden können. Mit dem Modellstoff sollen unterschiedliche Eigenschaften der Ablagerungen simuliert werden, damit die Untersuchungen des Abtragverhaltens unter definierten Randbedingungen durchgeführt werden können. Dabei sollen auch die bisher nicht betrachteten ablagerungsbedingten Einflussfaktoren wie zum Beispiel die Dicke und die Festigkeit der Ablagerungen berücksichtigt werden. Es ist daher zunächst erforderlich, einen passenden Modellstoff zu finden, der die gewünschten Charakteristika der Ablagerungen abbilden kann. Anschließend muss dieser Modellstoff in Rohre eingebracht werden, um dann die Form der Ablagerungen nachzubilden. Für die Durchführung der Abtraguntersuchungen und die Messung der Abtragleistung ist ein Versuchsstand erforderlich. Hierzu wird ein Prototyp des Schlagverfahrens in realem Maßstab aufgebaut, sodass die Wirkungen der Einflussfaktoren unter realitätsnahen Bedingungen untersucht werden können.

Im nachfolgenden Abschnitt wird zunächst die Nachbildung der Ablagerungen mithilfe eines Modellstoffes vorgestellt und anschließend auf den Aufbau des Versuchsstands sowie die eingesetzten Werkzeuge und die Versuchsmethodik eingegangen. Im zweiten Abschnitt werden Abtraguntersuchungen durchgeführt und die Wirkung verschiedener Einflussfaktoren auf den Abtragprozess analysiert.

6.1 Modellstoff, Versuchsstand, Methodik und Versuchsdurchführung

Der Modellstoff zum Nachbilden der Ablagerungen soll die wesentlichen mechanischen Eigenschaften der in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Ablagerungen aufweisen und einfach in Rohre eingebracht werden können. Wie in Abschnitt 2.1 aufgezeigt, treten die Ablagerungen in Rohren unterschiedlicher Dicke und Festigkeit beziehungsweise unterschiedlicher Härtegrade auf. Um das Abtragverfahren für unterschiedliche Randbedingungen dieser Art zu untersuchen, sollte der Modellstoff genügend Flexibilität haben, um die genannten Eigenschaften in verschiedenen Permutationen variieren zu können.

6.1.1 Kenngrößen des Modellstoffs

Im Rahmen dieser Arbeit wurden unterschiedliche Stoffsysteme untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, dass Zementstein die gestellten Anforderungen am besten erfüllt. Durch die Veränderung des Wassorzementwertes (W/Z-Wert) sowie der Trocknungszeit können die Festigkeit und damit auch die Härtegrade verändert werden. Des Weiteren kann der flüssige Zementleim aufgrund seiner zähen Form relativ einfach in Rohre eingebracht und die gewünschte Dicke durch die eingebrachte Menge reguliert werden. Systematische Untersuchungen des Abtragverhaltens können somit unter jeweils definierten Ausgangsbedingungen durchgeführt werden.

Zur Festlegung der Eigenschaften des Modellstoffs sind zunächst geeignete Kennwerte erforderlich. Die Ablagerungen bieten dabei aufgrund der geometrischen Randbedingungen nur eine begrenzte Möglichkeit zur Charakterisierung an. In Abschnitt 2.1.2 wurde aufgezeigt, dass sie aus verschiedenen mineralischen Stoffen bestehen und mithilfe der mechanischen Eigenschaft der Härte beschrieben werden können. Härte wird als der Widerstand, den ein Stoff der mechanischen Eindringung eines härteren Körpers entgegensetzt, definiert. Ziel des Abtragungsvorgangs ist, diesen mechanischen Widerstand der Ablagerungen durch den Schlag des Werkzeugs zu überwinden und so einen Bruch in den Ablagerungen einzuleiten. Deshalb stellt die Härte eine wichtige Charakterisierungsgröße für die Ablagerungen dar. Die

Klassifizierung nach der Härte hat zusätzlich den Vorteil, dass es sich um ein zerstörungsfreies Prüfverfahren handelt, das die Ermittlung des Härtewerts über die leicht zugängliche Oberfläche der Ablagerungen ermöglicht und damit unabhängig von den geometrischen Randbedingungen durchgeführt werden kann. Zur Bestimmung der Härte bietet sich die Härtebestimmung nach Mohs an. Dabei wird mithilfe von Ritzstiften unterschiedlicher Härte die Oberfläche des Prüfkörpers angeritzt. Durch anschließende Vergleiche kann die Oberflächenhärte festgestellt werden. Besonders bei Stoffen mit relativ geringer Härte ist dieses Verfahren aufgrund der lediglich 12 Härtestufen zu ungenau, es erlaubt nur eine grobe Klassifizierung des Materials. Um den Modellstoff hinsichtlich der Härte zu beschreiben, wird im Rahmen dieser Arbeit der Härtewert über die genauere Eindringtiefenmessung ermittelt. Hierbei wird der Härtewert durch die Messung des Abdrucks eines definierten Eindringkörpers in die Oberfläche ermittelt.

6.1.1.1 Modifizierte Härtemessung und Festlegung der Mischungsparameter

Bei der konventionellen Härtemessung nach Brinell wird mittels eines harten Eindringkörpers – in der Regel eine Stahlkugel – und einer definierten Kraft ein Abdruck auf dem Prüfkörper erzeugt. Nach dem optischen Messen des Abdruckes wird der Härtewert berechnet, welcher als der Quotient zwischen der Prüfkraft und der Abdruckfläche wie folgt definiert ist:

$$H_B = \frac{0.102 \times (2 \times F_p)}{\pi \times D \times (D - \sqrt{D^2 - d_k^2})} \quad \text{Formel 6-1}$$

mit den Parametergrößen:

H_B	[N/mm ²]	Brinellhärte
F	[N]	Prüfkraft
D	[mm]	Kugeldurchmesser
d_k	[mm]	Abdruckdurchmesser
0,102	(1N = 0,102 KP)	Umrechnungsfaktor von Newton in Kilopond
F_p	[N]	Prüfkraft

Bei nichtmetallischen Stoffen wie beispielsweise Holz oder zementgebundenen Stoffen, die eine eher heterogene Struktur aufweisen, ist ein Abdruck des Prüfwerkzeugs nur unscharf und schwer zu erfassen [Son-01]. Dabei kann der Abdruck, wie Zügler beschreibt [Züg-02], wegen einem möglichen Herauslösen des Materials, einer Wulstbildung und Einbrüchen am Rand oder einer unregelmäßigen Form nicht genau ermittelt werden. Dies führt zu Messungenauigkeiten. Zwar können diese Faktoren durch eine entsprechende Vorbereitung der Oberfläche reduziert, aber nicht ganz verhindert werden. Neue Methoden zur Messung der Härte basieren auf der

Messung der Tiefe des Abdrucks [Ast-07] [Iso-12]. Zwischen der gemessenen Eindringtiefe h_p und dem Durchmesser d_k des Abdruckes besteht folgender Zusammenhang:

$$h_p = \frac{D - \sqrt{D^2 - d_k^2}}{2} \quad \text{Formel 6-2}$$

Damit kann durch die Ermittlung der Eindringtiefe h_p der Abdruckdurchmesser d_k berechnet werden und daraus der Härtewert mittels der Eindringtiefe H_{BE} gemäß Formel 6-3 ermittelt werden.

$$H_{BE} = \frac{F}{D \cdot \pi \cdot h_p} \quad \text{Formel 6-3}$$

mit den Parametergrößen:

d_{Ab}	[mm]	Abdruckdurchmesser
D	[mm]	Kugeldurchmesser
h_p	[N/mm ²]	Eindringtiefe nach Entlastung
H_{BE}	[N/mm ²]	Eindringhärte

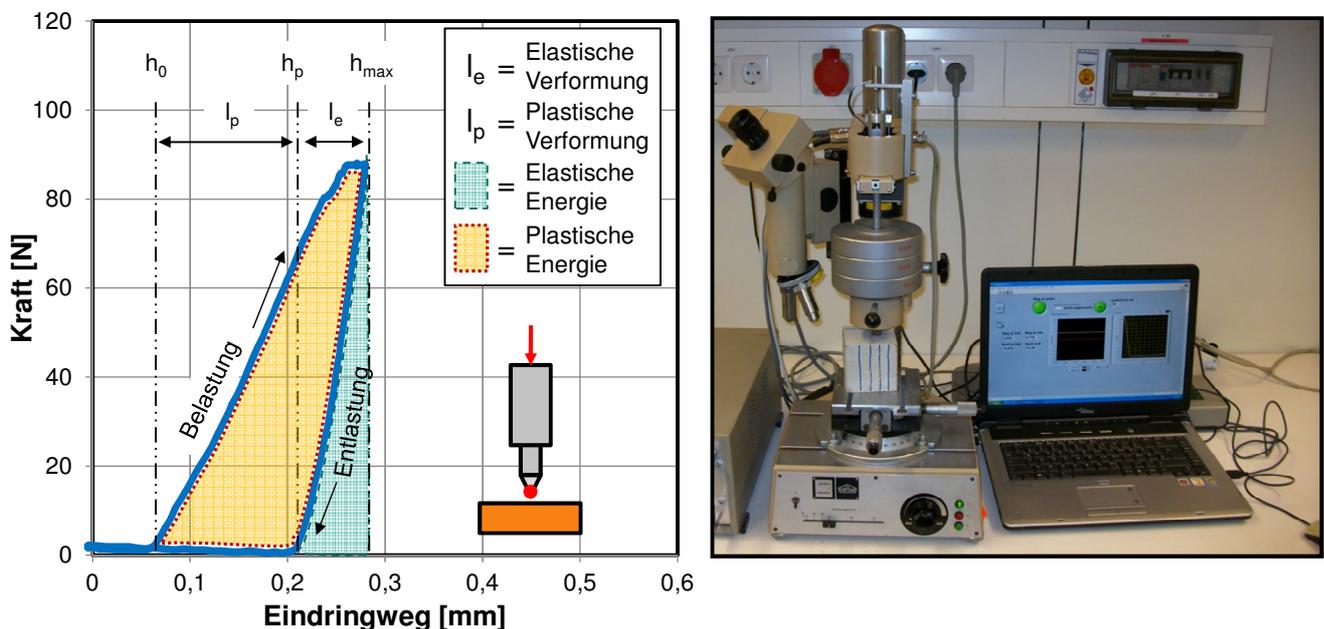


Abbildung 55: Kennwerte eines Kraft-Eindringtiefe-Diagramms bei der Bestimmung der Brinellhärte an zementgebunden Stoffen

In Abbildung 55 ist der typische Kraftverlauf dieses Messverfahrens über die Eindringtiefe eines Körpers in den Prüfkörper aus Zementstein dargestellt. Der Kraftverlauf besteht aus einer Anstiegsphase der Belastung, einer anschließenden Phase mit konstanter Belastung und einer

Entlastungsphase. Die Eindringtiefe h_p , die zur Bestimmung der Härte gemessen werden muss, ist dabei die Strecke von der Belastung bis zur Entlastung des Prüfkörpers. Mithilfe des Kraft-Eindringtiefe-Diagramms kann der Härtewert nicht nur nach der Belastung, sondern auch über den kompletten Lastbereich formuliert werden. Zusätzlich kann die elastisch-plastische Eigenschaft des Prüfkörpers als weitere Größe zur Charakterisierung des Modellstoffs herangezogen werden. Wie in Abbildung 55 dargestellt, ist die Fläche unter der Entlastungskurve ein Maß für die elastische Verformungsenergie. Das Maß für die plastische Verformungsenergie ist die von den Belastungs- und Entlastungskurven umschlossene Fläche. Vereinfacht kann nach Zügler [Züg-02] die jeweilige Eindringtiefe herangezogen werden, um auf die plastische beziehungsweise elastische Eigenschaft des untersuchten Werkstoffs zu schließen. Hierzu kann aus den ermittelten Kurven, wie in Abbildung 55 dargestellt, mittels der plastischen beziehungsweise elastischen Eindringtiefe die spezifische elastische beziehungsweise plastische Verformung wie folgt ermittelt werden:

$$e_e = \frac{h_{max} - h_p}{h_{max}}, \quad e_p = 1 - e_e \quad \text{Formel 6-4}$$

mit den Parametergrößen:

h_{max}	Maximale Eindringtiefe
h_p	Eindringtiefe nach Entlastung
e_p	Spezifisch plastische Verformung
e_e	Spezifisch elastische Verformung

Zur Festlegung einer geeigneten Mischung für den Modellstoff wird nun im Folgenden der Einfluss des W/Z-Werts und der Trocknungszeit auf die Härte von Zementstein untersucht. Anschließend wird aus diesen Ergebnissen die entsprechende Mischung für den Modellstoff für die Ablagerungen ausgewählt. Hierzu werden in einer Untersuchungsreihe Prüfkörper aus Zement mit den W/Z-Werten 0,3, 0,4, 0,45 und 0,5 hergestellt und anschließend deren Härte ermittelt. Der eingesetzte Zement ist ein schnellhärtender Zement des Typs CEM I und der Festigkeitsklasse 32,5 R. Daneben werden auch Prüfkörper aus Zement der gleichen Sorte, jedoch der höheren Festigkeitsklasse 52,5 R mit einem W/Z-Wert von 0,5 in die Untersuchung einbezogen. Die Härtemessungen werden an quadratischen Prüfkörpern mit einer Kantenlänge von 71 mm durchgeführt. Nach dem Einstellen des jeweiligen W/Z-Wertes und dem Mischen und Verdichten werden die Proben in einer Klimakammer bei einer Luftfeuchtigkeit von 65 % und einer Raumtemperatur von 20 °C gelagert und nach einem Tag aus der Schalung genommen. Die Versuche zur Ermittlung der Härte werden in einem Zeitraum von 28 Tagen durchgeführt.

Nach diesem Zeitraum wird die Normfestigkeit von Zementstein erreicht. Die weitere Erhärtung des Zementsteins verläuft ab diesem Zeitpunkt sehr langsam. Basierend auf den Härtemessungen innerhalb dieses Zeitraums erfolgt dann die Auswahl mehrerer Modellstoffe.

Zur Messung der Eindringhärte wird ein konventionelles Mikrohärtegerät des Herstellers Frank, Gerätetyp Finotest 38540, Lastbereich 0,098 N bis 98 N, eingesetzt. Die Eindringtiefe wird dabei digital erfasst. Die aufgezeichneten Messwerte werden dann mittels eines Verstärkers und am Computer mithilfe des Messprogramms LabVIEW ausgewertet. Das Prüfgerät ist in Abbildung 55 rechts dargestellt. Da der Zementstein anfänglich eine geringe Festigkeit aufweist, kommt als Eindringkörper eine verhältnismäßig große Stahlkugel mit einem Durchmesser von 5 mm zum Einsatz. Aufgrund der anfänglich geringen Festigkeit des Zementsteins wird die Prüfkraft auf die Stufe 60,74 N eingestellt. Zudem werden die Prüfkraft und der Eindringkörper während des Untersuchungszeitraums nicht verändert, damit eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist. Unter Einhaltung des erforderlichen Mindestabstands bei den Messstellen werden die Versuche zur statistischen Absicherung jeweils fünfmal wiederholt [Iso-02].

Die Ergebnisse der Untersuchungsreihe über einen Zeitraum von 28 Tagen sind in Abbildung 56 dargestellt. Der Verlauf der Härteentwicklung in Abbildung 56 links weist bei allen Mischungen zunächst einen steilen Anstieg auf, der dann in einen degressiven Verlauf übergeht.

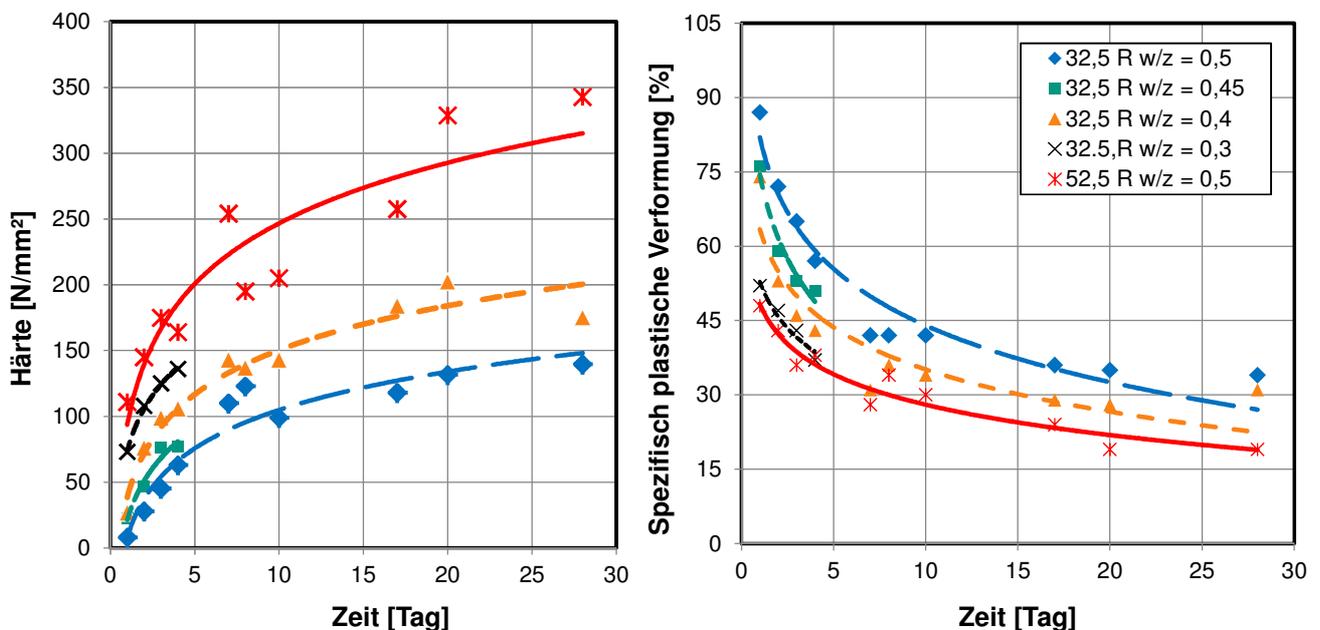


Abbildung 56: Verlauf der Härteentwicklung an Zementstein (links) und Verlauf der spezifisch plastischen Verformung bis 28 Tage (rechts)

Der Einfluss des W/Z-Werts ist deutlich. Je kleiner dieser ist, umso größer ist die Härte. Der hochfeste Zementstein der Festigkeitsklasse 52,5 R hat durchgehend die größte Härte, obwohl der W/Z-Wert relativ hoch ist. Mit steigender Härte werden die Messungen bei diesem Härtewert ungenauer. Die Ursache hierfür liegt in der Größe des Eindringkörpers und der konstanten Prüfkraft. Mit steigenden Härtewerten ist eine Anpassung des Eindringkörpers und der Eindringkraft erforderlich. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde im Rahmen dieser Untersuchungen die Anpassung nicht durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass der Verlauf des Härtewertes für die verschiedenen W/Z-Werte über den gemessenen Zeitraum ähnlich ist, wie der aus der Literatur bekannte Wert der Druckfestigkeit.

Wie bereits oben erwähnt, können weitere Materialkenngrößen aus den ermittelten Kraft-Eindringtiefe-Diagrammen gewonnen werden. Der Druck des Eindringkörpers auf die Oberfläche des Prüfkörpers verursacht sowohl plastische als auch elastische Verformungen. In Abbildung 56 rechts ist die plastische Eigenschaft der untersuchten Prüfkörper über die Dauer von 28 Tagen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein harter Werkstoff eine gute Elastizität und damit eine geringe Plastizität besitzt. Es sind deutliche Unterschiede zu Beginn der Untersuchungen zwischen den Prüfkörpern festzustellen. Der noch weiche Zementstein lässt große plastische Verformungen durch den Eindringkörper zu. Die plastische Verformbarkeit der Oberfläche nimmt im Laufe der Zeit durch die Erhärtung des Zementsteins ab und die Unterschiede verringern sich. Die durchgehend kleinste plastische Verformung zeigt sich beim hochfesten Zement der Festigkeitsklasse 52,5 R.

Basierend auf dieser Untersuchungsreihe wurden drei verschiedene Zementsteinvarianten als Modellstoff für die Nachbildung der Ablagerungen ausgewählt. Um den Einfluss der Härte auf den Abtragprozess zu untersuchen, wurden Mischungen der mittleren Härte von 76 H_{BE}, 143 H_{BE} und 227 H_{BE} ausgewählt. Damit ist eine große Spannbreite gegeben, die es erlaubt, einen möglichen Einfluss beim Abtragprozess zu erkennen. Wie die Ergebnisse der Untersuchungsreihe gezeigt haben, steigt die Elastizität der drei Mischungen mit steigender Härte. Zusätzlich zu diesen beiden Kennwerten wurde für die Mischungen die Druckfestigkeit ermittelt. In Tabelle 22 sind der für die Herstellung der Modellstoffvarianten notwendige W/Z-Wert sowie die Trocknungszeit und die Kennwerte der drei Modellstoffvarianten dargestellt. Daraus ergibt sich auch, dass die Dichte der ausgewählten Modellstoffvarianten annähernd konstant ist und im Bereich zwischen 1,8 und 1,9 g/cm³ liegt.

Tabelle 22: Parameter des Modellstoffs für die Nachbildung der Ablagerungen

Modellstoff	W/Z-Wert	Trocknung	Härte	Plastizität	Druckfestigkeit	Dichte
	[-]	[Tage]	[H _{BE}]	[%]	[MPa]	[kg/m ³]
Variante 1 (32,5 R)	0,45	3	76	53	19,3	1854
Variante 2 (32,5 R)	0,4	7	143	31	29,7	1911
Variante 3 (52,5 R)	0,5	7	227	28	54,0	1804

6.1.2 Vorgehensweise beim Nachbilden von Rohrablagerungen

Die gängigen Rohrgeometrien in der Erdöl- und Erdgasförderung sind der Tabelle 23 zu entnehmen. Am häufigsten wird das Steigrohr des Typs 2 7/8“ (in der Tabelle blau unterlegt) eingesetzt. Da es nicht möglich war, Rohre mit exakten Abmessungen zu bekommen, wurden die Abtraguntersuchungen in Anlehnung an diese Rohrgeometrie an einem Rohr mit einem Innendurchmesser von 62 mm und einem Außendurchmesser von 70 mm durchgeführt. Die Rohrlänge wurde auf 2 m begrenzt.

Tabelle 23: Bei der Erdgas- und Erdölförderung eingesetzte Rohre [Iso-10]

Rohrbezeichnung	Außendurchmesser	Innendurchmesser
2 3/8“	60,3 mm	50,64 mm
2 7/8“	73,02 mm	62 mm
3 1/2“	88,9 mm	76 mm
4“	101,6 mm	88,28 mm
4 1/2“	114,3 mm	100,54 mm

Zur Nachbildung der Ablagerungen muss der Modellstoff in das Rohr eingebracht werden. Dabei müssen die Ablagerungen im Rohrquerschnitt und auf der gesamten Rohrlänge gleichmäßig ausgebildet sein. Um dies zu erreichen, ist es hilfreich, wenn die Rohrrinnenfläche direkt zugänglich ist. Die Nachbildung der Ablagerungen erfolgt daher in zwei gleichen Rohrhälften, die anschließend zusammengesetzt werden. Die Herstellung der Modellstoffe erfolgt unter gleichen Bedingungen. Zuerst werden die Komponenten Zement und Wasser in Masseprozent abgewogen und anschließend etwa fünf Minuten maschinell gemischt. Dann wird eine definierte Menge der Mischung je nach gewünschter Ablagerungsdicke entnommen und in die Rohrhalbschalen gleichmäßig eingebracht. Mithilfe eines Überstreifers wird der zähe Zementleim über die gesamte Rohrlänge glattgestrichen. Danach werden die beiden Rohrhälften zu einem Rohr zusammengelegt und durch vier Rohrschellen in Position gehalten. Um eine gleichmäßige

Verteilung des Zementleims über den Rohrquerschnitt und die Fuge zu erreichen, wird das Rohr mithilfe eines Elektromotors in Rotation versetzt. Zum Schluss werden die Rohre mit dem gleichmäßig verteilten Zementleim so lange gelagert wie nötig ist, um die gewünschte Festigkeit der Ablagerungen zu erreichen. Vor und nach der Durchführung jedes Versuches werden die Rohre gewogen. Dadurch wird die tatsächliche Masse der noch im Rohr vorhandenen Ablagerungen bestimmt. Mithilfe dieser Vorgehensweise können im Rohr verschiedene Typen von Ablagerungen nachgebildet werden. Die Dicke der Ablagerung kann beliebig variiert werden und die Abtraguntersuchungen können unter den gewünschten Bedingungen reproduzierbar durchgeführt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Abtragergebnis in den beiden Rohrhälbschalen zu untersuchen und bei der Bewertung der Abtragleistung zu berücksichtigen. Der gerade beschriebene Prozess der Ablagerungsnachbildung ist in Abbildung 57 dargestellt.



Abbildung 57: Einbringen der Ablagerungen in Rohrhälfte (links), gleichmäßige Verteilung der Ablagerungen durch die Drehung des Rohrs (Mitte) und nachgebildete Ablagerung im Rohr der Länge von 2 m (rechts)

6.1.3 Versuchsstand zur Durchführung experimenteller Abtraguntersuchungen

Zur Untersuchung des Abtragverhaltens wird ein Versuchsstand für die Aufnahme der 2 m langen Rohre aufgebaut. Dieser besteht aus einer Einspannvorrichtung für die Positionierung des Rohrs, einer Vorschubeinheit, sowie dem Werkzeugträger und der Absaugvorrichtung. Die Einspannvorrichtung besteht aus jeweils zwei Klemmbackenpaaren, in die das Rohr hineingelegt wird. Durch das Schließen der Klemmbacken und das Anziehen der Flügelschrauben kann das Rohr fest eingespannt werden. Die Einspannvorrichtung ist an einem massiven Betonblock befestigt. Dadurch ist gewährleistet, dass das Rohr trotz der beim Abtragvorgang auftretenden Schlagkräfte sicher in Position gehalten wird. Der Vorgang selbst wird aus praktischen Gründen

an einem horizontal positionierten Rohr durchgeführt. Diese Positionierung erfordert einen aktiven Transport der herausgeschlagenen Ablagerungen aus dem Rohr unmittelbar nach dem Löseprozess. Hierzu wird am Rohrende der Saugstutzen eines Industriesauggeräts des Typs DC 3800 des Herstellers Dustcontrol angeordnet. Das Sauggerät erlaubt den Transport der Ablagerungsstücke und der gebildeten Stäube aus dem Rohr und verhindert, dass diese unkontrolliert austreten. Bei dem Transport der Ablagerungen vom Rohr in den Auffangbehälter konnte kein negativer Effekt auf die herausgelösten Ablagerungsstücke, etwa durch Kornzerkleinerung, festgestellt werden. Daher können die Ablagerungsstücke aus dem Auffangbehälter des Saugers zur weiteren Untersuchung und Bewertung des Abtrags herangezogen werden.



Abbildung 58: Einspannvorrichtung, Saugstutzen und Saugereinheit

Die Bewegung des Werkzeugträgers und der flexiblen Welle im Rohr wird durch eine neu konstruierte Vorschubeinheit realisiert. Eine Randbedingung bei der Gestaltung war die Möglichkeit, den Vorschub zu verändern, um dessen Einfluss auf den Abtrag zu untersuchen. Des Weiteren sollte ein Blockierschutz die Gefahr der Schädigung der Vorschubeinheit durch Feststecken des Werkzeugträgers im Rohr minimieren. Die Vorschubeinheit sollte zudem möglichst keinen Einfluss auf den Abtragprozess ausüben. Es wurde daher eine stationäre Vorschubeinheit entwickelt, die außerhalb des Rohrs platziert werden kann und so den Abtragprozess nicht verhindert. Die Vorschubeinheit besteht aus einem Elektromotor, einem verstellbaren Getriebe sowie zwei Rollen. Zwischen der Antriebsrolle und der lose gelagerten Rolle wird die flexible Welle des Werkzeugträgers eingespannt. Eine Vertiefung in der Antriebsrolle sorgt dafür, dass die flexible Welle permanent geführt wird, während sie sich durch das Rohr bewegt. Die Bewegung erfolgt dabei durch die Drehung der Antriebsrolle. Diese wird wiederum durch einen Planetengetriebe eingestellt. Damit kann der Vorschub durch Änderung der Übersetzung des Getriebes stufenlos verändert werden. Zusätzlich übernimmt die

Rohr außen eine Führungsfunktion für die flexible Welle. Der Blockierschutz wird durch die reibschlüssige Verbindung zwischen den beiden Rollen und der flexiblen Welle gewährleistet. Trifft der Werkzeugträger in der Vorschubrichtung auf einen Widerstand, so rutscht die flexible Welle zwischen den beiden Rollen durch, ohne dass die Vorrichtung Schaden nimmt. Um eine Umkehr des Vorschubs vorzunehmen, ist im Versuchsstand ein entsprechender Schalter vorgesehen. Am Ende des Abtragprozesses kann damit der Werkzeugträger automatisch aus dem Rohr heraus bewegt werden. Die nachfolgende Abbildung 59 zeigt zwei Ausschnitte der Vorschubeinheit an.

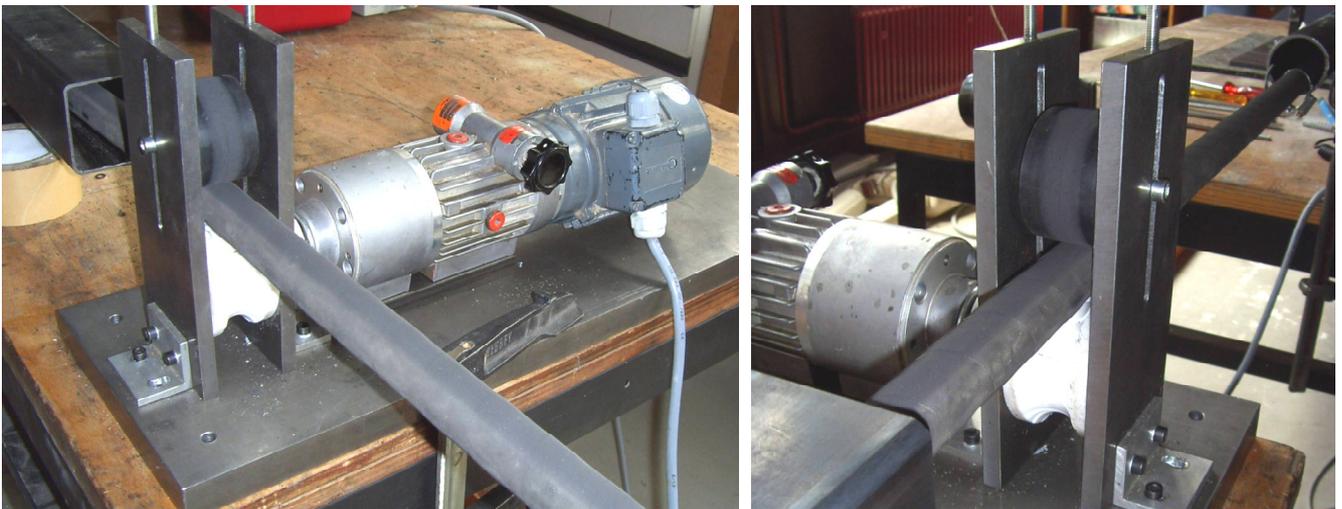


Abbildung 59: Vorschubeinheit

Die experimentellen Untersuchungen werden mit dem Werkzeugträger durchgeführt, der in Abschnitt 4.3.1 beschrieben wurde. Das Werkzeug wird stirnseitig an dem Werkzeugträger befestigt. Die Untersuchungen werden mit einem Werkzeugdurchmesser von 56 mm und einer Keilanzahl von 16 Keilen durchgeführt. Der Keilwinkel beträgt jeweils 60° bei einer Keillänge von 50 mm. Ähnlich wie im vorherigen Kapitel beschrieben, wird die Drehzahl der Unwucht über einen Elektromotor eingestellt und ist variabel. Zudem besitzt der Werkzeugträger ein Drehgelenk, sodass er sich frei im Rohr drehen kann, wodurch die Kontaktwahrscheinlichkeit erhöht wird.

6.1.4 Versuchsplan und Randbedingungen

Der Abtragprozess wird im nachfolgenden Abschnitt an unterschiedlichen Ablagerungsarten untersucht werden. Die Kombination aus der Härte und der Dicke ergibt die jeweilige Ablagerungskombination. Wie in Abschnitt 2.1.2 festgestellt wurde, liegt die Ablagerungsdicke in der Regel zwischen 1 und 3 mm. In den nachfolgenden Untersuchungen werden entsprechend

Ablagerungen der Dicken 1 mm, 2 mm und 3 mm berücksichtigt. Zudem wird die Härte der Ablagerungen in den Größen 76 H_{BE}, 114 H_{BE} und 225 H_{BE} variiert. Insgesamt ergibt die Kombination dieser beiden Parameter neun verschiedene Ablagerungsarten, die in Tabelle 24 aufgeführt sind.

Tabelle 24: Ablagerungstypen für die experimentellen Untersuchungen

	Dicke: 1 mm	Dicke: 2 mm	Dicke: 3 mm
Härte 1: 76 H _{BE}	1	2	3
Härte 2: 143 H _{BE}	4	5	6
Härte 3: 227 H _{BE}	7	-	-

Im Rahmen dieser Arbeit werden sieben dieser Ablagerungsarten berücksichtigt. Diese werden in Rohren nachgebildet und anschließend der Abtragsvorgang untersucht. Es wird dabei der Einfluss der prozess- und werkzeugbedingten Parameter näher untersucht. Die Variationsbereiche der einzelnen Parameter sind zusammenfassend in Tabelle 25 aufgeführt. Hierbei werden die wichtigen Einflussfaktoren (Frequenz, Abstand beziehungsweise Werkzeugdurchmesser und Beanspruchungszeit beziehungsweise Vorschub in verschiedenen Stufen) untersucht. Der Faktor der Frequenz wird bei jeder Ablagerungskombination zwischen den Stufen 150 Hz, 180 Hz, 190 Hz und 210 Hz variiert. Der Einflussfaktor des Abstands wird zwischen den vier Stufen 6 mm, 4,5 mm, 3 mm und 2 mm variiert. Dabei wird die Rohrgeometrie verändert, während die Werkzeuggeometrie unverändert bleibt. Für den Faktor Vorschub werden die Größen 10 mm/s, 20 mm/s und 50 mm/s untersucht. Bei einer Werkzeugkantenlänge von 50 mm entspricht dies jeweils einer theoretischen Beanspruchungszeit von circa 5 s, 1,7 s und 1 s.

Tabelle 25: Variationsbereiche der untersuchten Parameter

Parameter	Einheit	Variationsbereich			
		50	53	56	58
Werkzeugdurchmesser	[mm]	50	53	56	58
Frequenz	[Hz]	150	180	190	210
Vorschub	[mm/s]	10	30	50	-
Ablagerungshärte	[HBE]	76	143	227	-
Ablagerungsdicke	[mm]	1	2	3	-

Der Gesamtumfang dieser Versuchsreihe beträgt über 240 Rohre. Jede Versuchsreihe wird mit den gleichen Randbedingungen dreimal durchgeführt und der Mittelwert für die jeweilige Untersuchungsgröße berechnet. Dabei wird zunächst das Rohr mit den Ablagerungen in der Aufnahmevorrichtung ausgerichtet und durch die Einspannbacken positioniert. Danach werden der Vorschub und die Drehzahl des Werkzeugträgers eingestellt und dieser einschließlich des Werkzeugs am Rohranfang ausgerichtet. Nach der Befestigung der Absaugvorrichtung am Rohrende wird das Experiment gestartet. Während des Versuchs bewegt sich der Werkzeugträger mit den eingestellten Parametern durch das Rohr und entfernt die Ablagerungen aus der Rohrinnenfläche. Die herausgeschlagenen Ablagerungsstücke werden dann durch den Sauger aus dem Rohr heraus transportiert und in einem Auffangbehälter gesammelt. Wenn das Rohrende erreicht ist, wird der Vorschub umgekehrt und der Werkzeugträger auf diese Weise aus dem Rohr heraus bewegt. Am Ende eines Versuches werden die Rohre gewogen und durch einen Vergleich mit der Masse des Rohrs vor dem Versuch die entfernte Ablagerungsmasse beziehungsweise Abtragleistung ermittelt. Zusätzlich wird mit Maschensieben eine Analyse der Korngröße durchgeführt, die bei der Untersuchung der Gesamtergebnisse berücksichtigt wird. Abbildung 60 zeigt exemplarisch die unterschiedlichen Korngrößen nach einer Analyse des Abtragguts.



Abbildung 60: Kornfraktionen des Abtragguts

6.2 Experimentelle Untersuchung des Abtragverhaltens

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der experimentellen Abtraguntersuchung vorgestellt. Dabei werden folgende Wirkungen untersucht:

- Einfluss der Ablagerungsdicke
- Einfluss der Ablagerungshärte
- Einfluss der Frequenz
- Einfluss des Vorschubs
- Einfluss des Abstands
- Einfluss der Drehung des Werkzeugträgers

Die Frequenz dient als Basisgröße und wird bei der Untersuchung aller Einflussgrößen mit variiert, sodass bei der Interpretation der Ergebnisse stets eine weitere Größe zur Verfügung steht und die Aussagekraft der Annahmen zu einer Untersuchungsgröße erhöht werden kann. Zum Abschluss der Untersuchungen wird der Einfluss der freien Drehung des Werkzeugträgers ermittelt, der bei allen Versuchen zum Einsatz kommt.

6.2.1 Einfluss der Ablagerungsdicke und Frequenz des Werkzeugträgers

Um den Einfluss der Ablagerungsdicke auf die Abtragleistung zu ermitteln, wurde für verschiedene Frequenzen die Ablagerungsdicke in den Stärken 1 mm, 2 mm und 3 mm variiert. Die Randbedingungen dieser Untersuchung sind in Abbildung 61 links dargestellt. Bis auf den Einflussfaktor Frequenz, der im Bereich 150 bis 200 Hz variiert wurde, wurden alle weiteren Einflussfaktoren konstant gehalten. Der Vorschub betrug 10 mm/s, die Härte 76 H_{BE}. Die Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe sind in Abbildung 61 rechts in einem Säulendiagramm zusammengefasst. Aufgrund des vergleichsweise geringen Durchdringungswiderstandes ist die höchste Abtragleistung bei einer Ablagerungsdicke von 1 mm auszumachen. Bereits mit einer niedrigen Frequenz von 150 Hz konnte bei dieser Dicke eine Abtragleistung von circa 66 % erreicht werden. Die Erhöhung der Frequenz auf 180 Hz erhöhte die Schlagintensität und führte zu einer Zunahme der Abtragleistung um durchschnittlich 20 % auf 86 %. Eine weitere Erhöhung der Frequenz und damit der Schlagintensität hatte nur eine vernachlässigbare Änderung der Abtragleistung zur Folge. Bei der Erhöhung der Frequenzen auf 190 Hz und anschließend auf 210 Hz betrug die Änderungen 3 % beziehungsweise 4 %. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass bei einer Frequenz von 180 Hz die Schlagintensität erreicht wird, bei der die Ablagerungen

durch die Werkzeugspitze vollständig durchdrungen werden. Eine weitere Erhöhung der Frequenz beziehungsweise der Schlagintensität führt zu keiner weiteren Verbesserung der Abtragleistung. Trotz der ausreichenden Schlagintensität konnte bei dieser Parameterkombination kein vollständiger Abtrag erreicht werden. Es ist daher davon auszugehen, dass zwar die Schlagintensität ausreichend hoch ist, aber die Kontaktwahrscheinlichkeit des Werkzeugs mit der Rohrinne wand noch nicht optimal ist. Entsprechend des Beanspruchungsmodells kann diese durch eine Vergrößerung der Verweilzeit des Werkzeugs beziehungsweise durch eine Verkleinerung des Vorschubs effektiv erhöht werden. Alternativ kann auch die Keilanzahl vergrößert werden, die Verringerung des Vorschubs ist jedoch leichter durchzuführen. Daher wird der Einfluss dieses Parameters im nächsten Abschnitt 6.2.2 detaillierter betrachtet.

Versuchsrandbedingungen	
Ablagerungshärte	76 H _{BE}
Vorschub	10 mm/s
Frequenzen	150/ 180/ 190/ 210 Hz
Ablagerungsdicke	1/ 2/ 3 mm
Ø Werkzeug	D = 56 mm
Versuchsumfang	ca. 50 Rohre

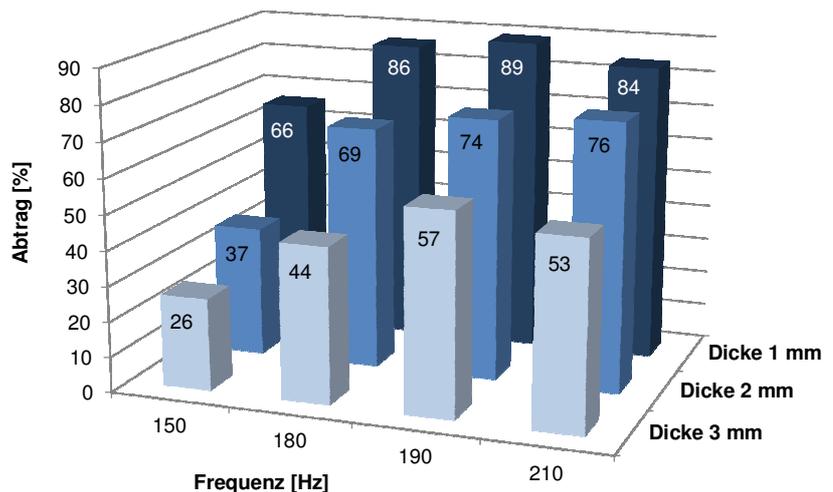


Abbildung 61: Versuchsplan und Einfluss der Ablagerungsdicke auf die Abtragleistung

Bei den Versuchen mit einer Ablagerungsdicke von 2 mm kam es zu ähnlichen Ergebnissen. Allerdings nahm die Verbesserung der Abtragleistung bei der Erhöhung der Frequenz von 150 Hz auf 180 Hz nur durchschnittlich um 32 % zu. Auch bei dieser Ablagerungsdicke führte die Erhöhung der Frequenz von 180 Hz auf 190 Hz beziehungsweise von 190 Hz auf 200 Hz nur zu einer vergleichsweise marginalen Verbesserung der Abtragleistung von circa 5 % beziehungsweise 7 %. Die Beurteilung der Rohrinne fläche nach dem Abtrag zeigt, dass Ablagerungen an den Stellen nicht entfernt werden konnten, an denen das Werkzeug keinen Kontakt mit den Ablagerungen hatte. Dies ist wiederum ein eindeutiges Indiz dafür, dass die Schlagintensität ausreichend hoch ist und die Kontaktwahrscheinlichkeit des Werkzeugs mit der

Rohrinnenwand noch nicht optimal ist. Die Erhöhung der Kontaktwahrscheinlichkeit kann, wie bereits erwähnt, durch die Veränderung der Verweilzeit beziehungsweise des Vorschubs erreicht werden. Entsprechend konnte bei den Rohren mit den nicht vollständig entfernten Ablagerungen durch einen wiederholten Versuch mit der gleichen Frequenz und den gleichen Parametern die Abtragleistung zusätzlich gesteigert werden. Die Ergebnisse sind in Anhang 6 angegeben. Die Wiederholung eines Versuches entspricht einer Halbierung des Vorschubs, da sich das Werkzeug die doppelte Zeit im Rohr befindet. Die Abtragleistung konnte dadurch ab einer Frequenz von 180 Hz auf über 90 % verbessert werden. Des Weiteren haben die Ergebnisse mit dieser Ablagerungsdicke gezeigt, dass wie zuvor die Schlagintensität bei einer Frequenz von 150 Hz nicht ausreichend ist. Die Abtragleistung betrug im Mittel etwa 37 % und ist damit deutlich geringer als bei den höheren Frequenzen. Eine Vergrößerung der Beanspruchungszeit führte zwar auch bei dieser Frequenz zu einer Vergrößerung der Abtragleistung um 18 %, jedoch ist die Gesamtleistung mit knapp über 50 % immer noch vergleichsweise gering. Eine zu geringe Schlagintensität hat damit einen großen Einfluss auf die Abtragleistung. Gleichzeitig führt eine extrem hohe Schlagintensität zu keiner nennenswerten Verbesserung der Abtragleistung.

Der Durchdringungswiderstand ist bei einer Ablagerungsdicke von 3 mm am höchsten. Bei dieser Ablagerung wurde die geringste Abtragleistung (26 %) bei einer Frequenz von 150 Hz gemessen. Durch die Erhöhung der Frequenz auf 180 Hz stieg die Abtragleistung auf 44 % an. Eine weitere Steigerung der Frequenz auf 190 Hz und 210 Hz führt zu einer Erhöhung der Abtragleistung um circa 13 % beziehungsweise zu einer Erniedrigung um circa 4 %. Zwar zeigt die schrittweise Erhöhung der Frequenz bis 210 Hz eine tendenzielle Verbesserung des Abtrags, jedoch ist offensichtlich, dass der untersuchte Frequenzbereich nicht ausreichend hoch war, um bei dieser Dicke eine bessere Abtragleistung zu erzielen. Diese Vermutung wird auch durch die Ergebnisse der Korngrößenanalyse des Abtragguts in Abbildung 62 gestützt. Die Verteilung zeigt, dass bei einer 1 mm dicken Ablagerung und zunehmender Frequenz eine Erhöhung der Korngröße festgestellt werden kann. Mit der Erhöhung der Schlagintensitäten geht also eine großstückigere Zerkleinerung der Ablagerung einher. Dies liegt daran, dass die Ablagerungen aufgrund der relativ geringen Dicke von 1 mm durch die Schlagintensitäten vollständig durchdrungen werden können. Die Korngrößenverteilung weist im Vergleich dazu bei der 3 mm dicken Ablagerung keine frequenzabhängigen Unterschiede auf. Offensichtlich kann diese relativ dicke Ablagerung mit der zur Verfügung stehenden Schlagintensität nicht vollständig durchdrungen werden. Beim Schlag tritt daher ein oberflächennaher Abtrag der Ablagerung auf. Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 erläutert, kommt es beim Schlag im Kontaktbereich des

Werkzeugs mit der Ablagerung direkt unterhalb der Werkzeugkante zu einer Pulverisierung der Ablagerungen. Die nachfolgenden Werkzeugschläge führten zu einer Vergrößerung dieses zertrümmerten Bereichs, ohne dass die Ablagerungen vollständig durchdrungen werden konnten.

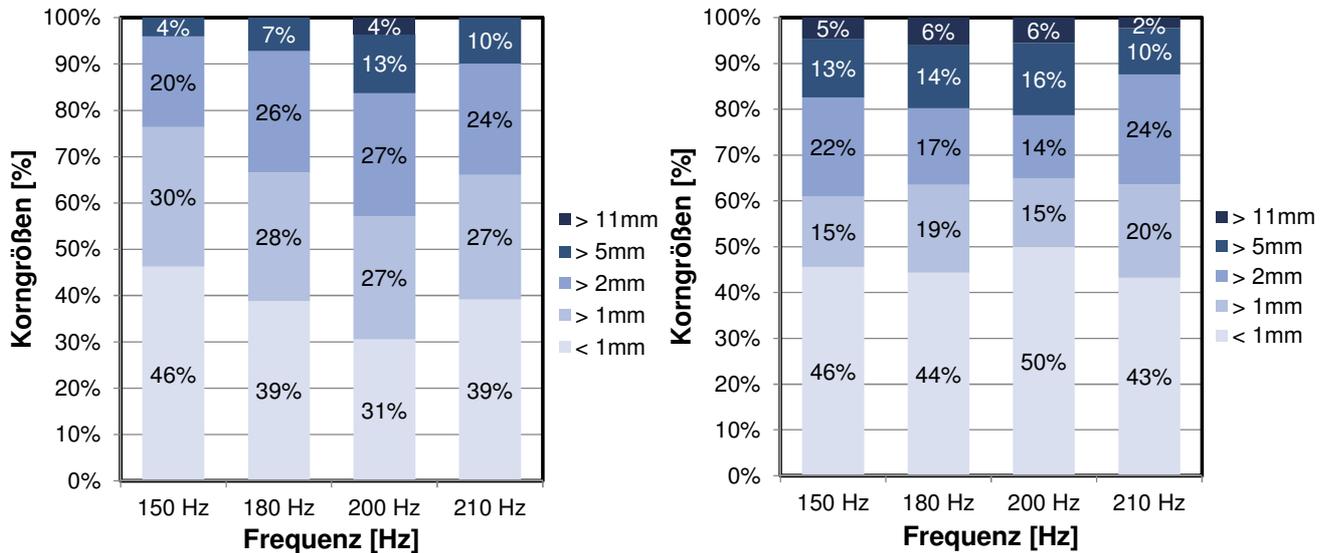


Abbildung 62: Verteilung der Korngrößen bei Ablagerungsdicken von 1 mm (links) und 3 mm (rechts)

Der Anteil feinkörnigen Materials (< 1 mm) war entsprechend groß. Innerhalb des betrachteten Frequenzbereichs wurde tendenziell keine Veränderung der Korngrößenverteilung festgestellt. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass eine weitere Erhöhung der Frequenz in einen weit oberhalb des untersuchten Spektrums liegenden Bereich eine Verbesserung der Abtragleistung ermöglicht. Dies wurde bereits in Tabelle 2 des Abschnitts 2.3.2 aufgezeigt. Der Kraftbedarf für einen Keil zum Eindringen in einen Stoff hängt proportional mit der Eindringtiefe zusammen. Bei einer vergleichsweise dicken Ablagerung gleicher Festigkeit ist daher zu erwarten, dass mehr Kraft beziehungsweise eine höhere Schlagintensität für die Durchdringung benötigt wird. Da die Frequenz des Werkzeugträgers aufgrund des eingesetzten Elektromotors nicht mehr erhöht werden kann, muss in diesem Falle auf andere Maßnahmen zur Erhöhung der Schlagintensität zurückgegriffen werden. Eine Möglichkeit stellt dabei die Verkleinerung des Keilwinkels (vergleiche Tabelle 2) dar, wodurch die erforderliche Kraft beim Eindringen reduziert werden kann. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Schlagintensität kann nach dem Beanspruchungsmodell durch die Änderung des Abstands erreicht werden. Positiv wirkt sich dabei die Erhöhung der Schlaghäufigkeit aus. Dieser Einflussfaktor wird in Abschnitt 6.2.4 näher erläutert. Auch bei der Ablagerungsdicke von 3 mm zeigte sich, dass die Abtragleistung durch eine wiederholte Durchführung des Versuchs verbessert werden kann. Die Abtragmenge ist bei

gleicher Beanspruchung jedoch deutlich kleiner und beträgt bei einer Frequenz von 150 Hz circa 11 %, bei den restlichen Frequenzen durchschnittlich circa 20 %. Entsprechend sinkt die Effizienz des Verfahrens bei dieser Maßnahme, da auch Bereiche des Rohrs beansprucht werden, in denen die Abtragung schon im ersten Durchlauf erfolgreich war.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine größere Dicke der Ablagerung eine Herausforderung für den Abtragprozess darstellen kann. Während bei der Ablagerung von 1 mm eine fast vollständige Entfernung erreicht werden konnte, war mit der Zunahme der Ablagerungsdicke auf 2 mm und 3 mm ein deutlicher Abfall der Abtragleistung zu beobachten. Durch die Erhöhung der Frequenz konnte bei jeder Ablagerungsdicke eine anfängliche Verbesserung der Abtragleistung festgestellt werden. Eine weitere Verbesserung wurde bei der 2 mm dicken Ablagerung durch eine erneute Versuchsdurchführung erreicht, da dadurch die Beanspruchungszeit des Werkzeugs zunahm. Bei der 3 mm dicken Ablagerung war eine Erhöhung der Frequenzen in dem betrachteten Frequenzbereich nicht zielführend. Die Abtragleistung lag im Mittel durchgehend bei unter 60 %. Auch hier hat eine wiederholte Durchführung des Prozesses eine Verbesserung der Abtragleistung um etwa 20 % herbeigeführt. Damit kommt der Beanspruchungszeit, die durch den Vorschub geregelt wird, eine wichtige Bedeutung für die Abtragleistung zu. Die Effizienz des Verfahrens sinkt dadurch jedoch, weil auch Bereiche des Rohrs bearbeitet werden, die keine Ablagerungen mehr haben. Das Verfahren bietet daher eine Optimierungsmöglichkeit für einen partiellen Abtrag. In Abbildung 63 ist dargestellt, dass die Rohrablagerungen zwar größtenteils entfernt wurden, es jedoch einige Stellen gibt, an denen Restablagerungen übriggeblieben sind. Es ist daher sinnvoll, diese Bereiche zunächst zu erkennen und anschließend gezielt zu beanspruchen.

Die Analyse der Korngröße hat gezeigt, dass durch die Erhöhung der Schlagintensität eine höhere Effizienz des Verfahrens erreicht werden kann. Dies gilt vor allem dann, wenn die Schlagintensität ausreichend hoch ist, um die Ablagerungsschicht zu durchdringen. Eine zusätzliche Erhöhung der Frequenz führt tendenziell zu einer großstückigeren Zerkleinerung der Ablagerungen. Der Fragmentierungsanteil und damit der Energiebedarf beim Bruch der Ablagerungen werden dadurch verkleinert. Wird die Schlagintensität über den optimalen Punkt hinaus weiter erhöht, führt dies zu keiner deutlichen Verbesserung der Abtragleistung. Stattdessen werden durch die überschüssige Energie das Rohr und das Werkzeug unnötig belastet. Es ist daher erforderlich, zunächst die Spielräume anderer Parameter auszuschöpfen, bevor die weitere Erhöhung der Schlagintensität in Betracht gezogen wird.

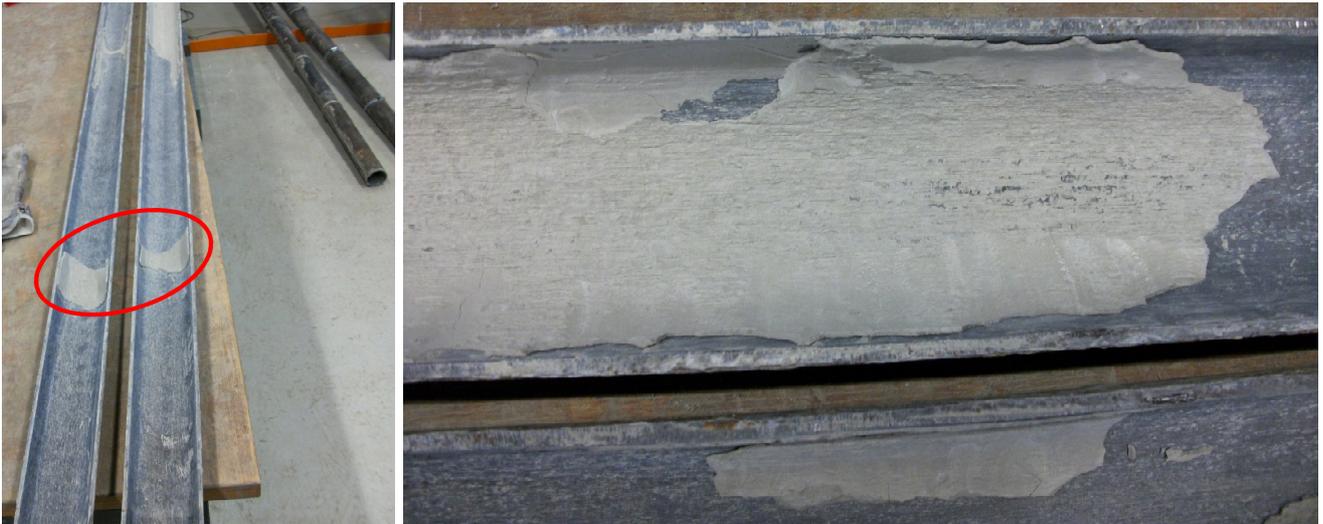


Abbildung 63: Partielle vorhandene Ablagerung nach einem Abtragversuch

6.2.2 Einfluss des Vorschubs

Die Bedeutung der Beanspruchungszeit konnte bereits im vorherigen Abschnitt aufgezeigt werden. Zur systematischen Untersuchung des Einflusses des Vorschubs auf die Abtragleistung wird dieser mit 10 mm/s, 20 mm/s und 30 mm/s variiert. Der Versuchsplan dieser Untersuchungsreihe ist in Abbildung 64 links dargestellt. Daneben sind die Ergebnisse für eine Ablagerungsdicke von 1 mm bei einer Härte von 76 H_{BE} abgebildet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe zeigen in Abhängigkeit der Frequenz jeweils einen ähnlichen Verlauf. Tendenziell wird beim Verkleinern des Vorschubs und der damit einhergehenden Vergrößerung der Beanspruchungszeit die Abtragleistung für jede Frequenz verbessert. Dies bestätigen die im Beanspruchungsmodell festgestellten Beobachtungen. Der große Einfluss des Vorschubs auf die Abtragleistung ist besonders bei einer Frequenz von 180 Hz zu erkennen. Die Verringerung des Vorschubs von 50 mm/s auf 30 mm/s führte zu einer Steigerung der Abtragleistung um circa 44 %. Eine weitere Reduzierung des Vorschubs auf 10 mm/s erhöht die Abtragleistung schließlich von ursprünglich 18 % auf 89 %. Ein ähnlicher Einfluss des Vorschubs ist auch bei einem höheren Frequenzniveau zu erkennen. Dabei wird die Abtragleistung im Mittel vergrößert, und gleichzeitig der Einfluss des Vorschubs verringert, da die Verbesserung der Abtragleistung teilweise aufgrund der höheren Schlagintensität hervorgerufen wird. Umgekehrt beeinflusst der Vorschub die Stärke des Einflusses der Frequenz. Bei einem Vorschub von 10 mm/s ist der Einfluss der Frequenz schon ab 180 Hz zu vernachlässigen. Es gilt, dass je größer der Vorschub ist, umso größer ist auch die Wirkung der Frequenz auf die Abtragleistung. Die Ursache hierfür liegt darin, dass beide Größen letztlich die Stärke der Beanspruchung beeinflussen. Ist ein Faktor auf einem hohen Niveau, nimmt die Wirkung des zweiten Faktors entsprechend ab. Diese

Erkenntnis ist wichtig, weil sie einen Ansatzpunkt zur Optimierung des Abtragverfahrens liefert. In diesem Fall ist beispielsweise bei einer Frequenz von 180 Hz und einem Vorschub von 10 mm/s eine Erhöhung der Frequenz zur Steigerung der Abtragleistung nicht effizient, da die Wirkung äußerst gering ist. Stattdessen empfiehlt es sich, zur Verbesserung der Abtragleistung andere Maßnahmen zur Steigerung der Beanspruchung zu treffen. Generell sollte eine Erhöhung der Frequenz nicht die erste Wahl zur Abtragoptimierung sein. Dieser Faktor besitzt nämlich einen quadratischen Einfluss auf die Beschleunigung des Werkzeugträgers. Dadurch nehmen die Intensität der Beanspruchung des Werkzeugs und des Werkzeugträgers und damit auch der Verschleiß zu. Stattdessen kann, wie bereits im vorherigen Abschnitt aufgezeigt, durch eine wiederholte Abtragung und damit einer Reduzierung der Beanspruchungszeit eine Erhöhung der Abtragleistung erreicht werden.

Versuchsrandbedingungen	
Ablagerungshärte	76 H _{BE}
Vorschub	10/ 30/ 50 mm/s
Frequenzen	150/ 180/ 200/ 210 Hz
Ablagerungsdicke	1 / 2/ 3 mm
Ø Werkzeug	D = 56 mm
Versuchsumfang	ca. 50 Rohre

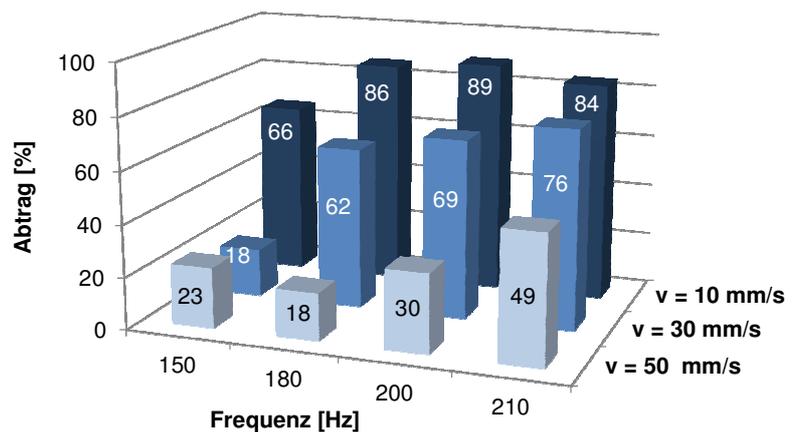


Abbildung 64: Versuchsplan und Einfluss des Vorschubs auf die Abtragleistung bei einer Ablagerungsdicke von 1 mm und einer Härte von 76 H_{BE}

Die Analyse der Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe erlaubt es, eine weitere Strategie zur Optimierung des Abtragprozesses abzuleiten. Eine kurzfristige und hohe Beanspruchung der Ablagerung, beispielsweise mit einer Frequenz von 210 Hz und einem relativ großen Vorschub von 50 mm/s führen zu einer fast 50%-igen Abtragleistung. Diese Parameterkombination könnte beispielsweise zunächst als eine Art Grobdekontamination für eine Abtragaufgabe mit deutlich kleinerem Vorschub praktiziert werden. Dabei ist die Abtragung vorzugsweise mit Parameterwerten für eine niedrige Belastung von Werkzeug und Werkzeugträger, erreichbar etwa durch eine geringe Frequenz, durchzuführen, um anschließend die restlichen Ablagerungen zu entfernen.

Die Untersuchung des Vorschubs hat Möglichkeiten aufgezeigt, die eine Verbesserung der Abtragleistung und der Effizienz des Verfahrens ermöglichen. Um diese Ergebnisse zu verifizieren, wurde der Vorschub auch mit zwei weiteren Ablagerungsarten variiert. Es wurden Abtraguntersuchungen mit einer Ablagerungsdicke von 2 mm und den Härten $76 H_{BE}$ sowie $143 H_{BE}$ durchgeführt. Dabei wurde der Vorschub jeweils zwischen 30 mm/s und 10 mm/s variiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe sind in Abbildung 65 dargestellt.

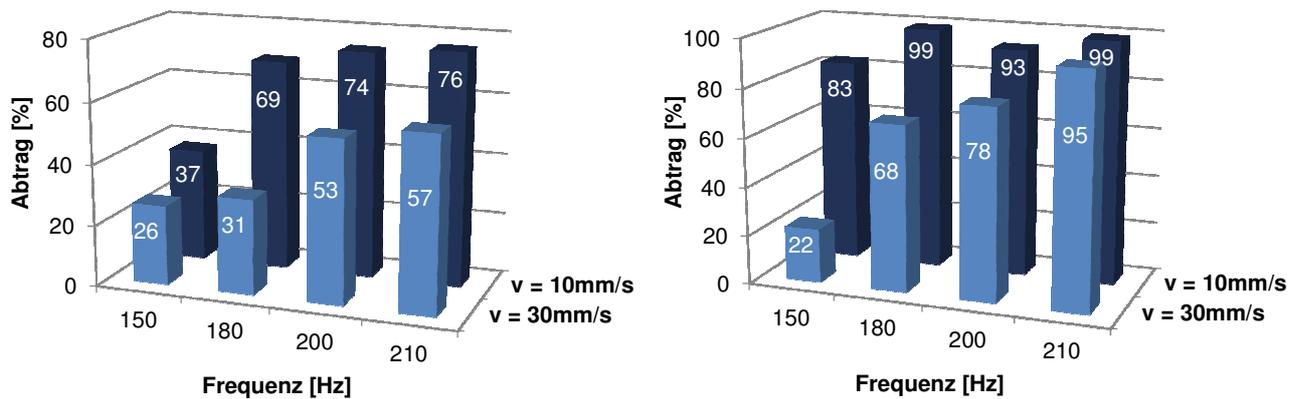


Abbildung 65: Einfluss des Vorschubs bei einer Ablagerungsdicke von 2 mm und einer Härte von $76 H_{BE}$ (links) bzw. einer Härte von $143 H_{BE}$ (rechts)

Die Ergebnisse bestätigen nochmals die den Einfluss des Vorschubs betreffenden Aussagen. Wird der Vorschub von 30 mm/s auf 10 mm/s bei einer Ablagerungshärte von $76 H_{BE}$, verkleinert, so ist auch hier bei allen drei Frequenzen eine deutliche Steigerung der Abtragleistung festzustellen. Bei einer Frequenz von 200 Hz beziehungsweise 217 Hz beträgt der Anstieg etwa 21 % beziehungsweise 19 %. Die Steigerung fällt bei einer Frequenz von 180 Hz mit 38 % noch größer aus und zeigt damit deutlich, dass die richtige Auswahl der Parameter zu großen Verbesserungen der Abtragleistung führt. Auch bei der größeren Ablagerungshärte von $143 H_{BE}$ zeigt sich ein ähnlicher Einfluss des Vorschubs. Liegt dieser bei 30 mm/s, kann die Abtragleistung erst durch die Steigerung der Frequenz schrittweise auf circa 95 % erhöht werden. Hingegen zeigt sich bei einer Verringerung des Vorschubs um zwei Drittel auf 10 mm/s eine Abtragleistung von circa 99 % bei der relativ kleinen Frequenz von 180 Hz. Im Vergleich zur Ablagerungshärte von $76 H_{BE}$ konnten bei sonst gleichen Parametern bei einer Härte von $143 H_{BE}$ deutlich bessere Abtragleistungen erreicht werden. Die Ursache dafür wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Der Einflussfaktor Vorschub regelt die Größe der übertragenen Beanspruchung und hat daher große Wirkung auf die Abtragleistung. Ein optimal gewählter Vorschub führt zwar zu einer größeren Beanspruchungszeit des Werkzeugs im Rohr, kann jedoch die Belastung des Werkzeugs und des Werkzeugträgers deutlich verringern.

6.2.3 Einfluss der Härte der Ablagerungen

Die Ablagerungen in den Rohren besitzen förderstellenabhängige Eigenschaften. Eine der wichtigsten mechanischen Eigenschaft ist die Festigkeit beziehungsweise die Härte. Beim Schlagverfahren muss der Widerstand der Ablagerungen durch das Eindringen des Werkzeugs überwunden werden. Dies entspricht der klassischen Definition der Härte: sie ist der Widerstand, dem ein harter Körper beim Eindringen in einen anderen Körper begegnet. Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, führt das Eindringen eines Werkzeugs in sprödes Material zu Rissbildung, Risswachstum und letztlich zum Bruch des Stoffgefüges. Um zu untersuchen, welchen Einfluss die Härte im Abtragprozess spielt, wurden drei Ablagerungen mit Härten von $76 H_{BE}$, $143 H_{BE}$ und $225 H_{BE}$ nachgebildet. Die Druckfestigkeitsuntersuchungen dieses Modellstoffs sind in Tabelle 22 dargestellt. Sie zeigen ähnlich wie der Härtewert einen unterschiedlichen Druckfestigkeitswert an. Es kann daher von einem Stoff mit unterschiedlichen mechanischen Kennwerten ausgegangen werden. In Abhängigkeit dieser Größen kann nachfolgend der Einfluss auf die Abtragung untersucht werden.

Es wurde zunächst die Härte für eine Ablagerungsdicke von 1 mm variiert. Die Randbedingungen des Versuches sind in Abbildung 66 links dargestellt. Neben der Härte wurde in dieser Versuchsreihe die Frequenz verändert. Je nach Frequenzen zeigen die Ergebnisse für die drei Härtewerte (siehe Abbildung 66 rechts) ein ähnliches Abtragverhalten. Die niedrige Abtragleistung von circa 66 % liegt bei einer Frequenz von 150 Hz bei den Ablagerungshärten $76 H_{BE}$ und $143 H_{BE}$ vor. Eine Erhöhung der Frequenz führt bei beiden Ablagerungstypen zu einem deutlichen Anstieg der Abtragleistung. Diese liegt bei einer Frequenz von 180 Hz und einer Ablagerungshärte von $76 H_{BE}$ bei circa 86 %, bei einer Ablagerungshärte von $143 H_{BE}$ und gleicher Frequenz bei circa 97 %. Auffallend ist bei dieser Untersuchungsreihe, dass die Ablagerungen mit der größten Härte ($225 H_{BE}$) schon bei der kleinsten Frequenz (150 Hz) durchschnittlich zu über 90 % entfernt werden können. Bei weiterer Erhöhung der Frequenz ist ein vollständiger Abtrag zu verzeichnen. Es zeigte sich weiterhin, dass die geringste Abtragleistung konstant bei der Ablagerung mit der kleinsten Härte ($76 H_{BE}$) auftritt. Eine Erklärung für dieses Resultat liegt in den Eigenschaften eines harten Materials: der Widerstand gegen das Eindringen der Werkzeugspitze in die Ablagerung ist zwar bei einem harten Werkstoff

größer, er weist aber auch eine größere Sprödigkeit auf. Wird der Bruchwiderstand beim Schlag überwunden, so kommt es zu einem Sprödbbruch der Ablagerungen. Dieser ist umso ausgeprägter, je größer die Härte beziehungsweise die Sprödigkeit des Materials ist. Dies kann auch schon anhand des Kennwerts des verwendeten Modellstoffs in Tabelle 22 erkannt werden. Dort steigt die Elastizität des Stoffes mit der Härte an. Entsprechend nimmt die spezifisch plastische Verformung ab. Der Modellstoff reagiert mit zunehmender Härte deutlich spröder. Daher ist es nachvollziehbar, dass die Abtragleistung bei einer Härte von 225 H_{BE} bereits bei der Frequenz von 150 Hz bei über 90 % liegt und es durch eine Erhöhung der Frequenz zum vollständigen Abtrag der Ablagerungen kommt.

Versuchsrandbedingungen	
Ablagerungshärte	76/ 143/ 225 H _{BE}
Vorschub	10 mm/s
Frequenzen	150/ 180/ 200/ 217 Hz
Ablagerungsdicke	1/ 2/ 3 mm
Ø Werkzeug	D = 56 mm
Versuchsumfang	ca. 50 Rohre

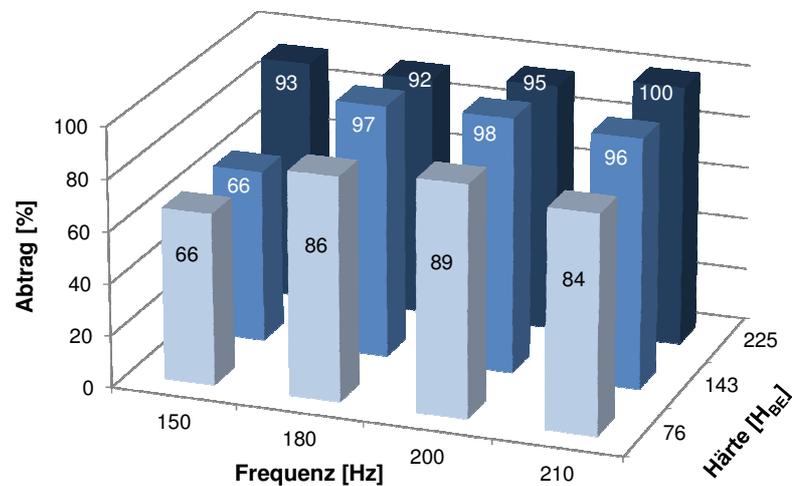


Abbildung 66: Einfluss der Härte bei einer Ablagerungsdicke von 1 mm

In dieser Untersuchungsreihe mit den Ablagerungsdicken von 2 mm und 3 mm wird die Ablagerung der Härte 225 H_{BE} mit der kleinsten spezifischen Plastizität nicht mehr berücksichtigt, da diese aufgrund ihrer großen Härte und der daraus folgenden Sprödigkeit keine wesentliche Herausforderung für die Abtragung darstellt. Stattdessen werden die beiden Modellstoffe mit den Härten 76 H_{BE} und 143 H_{BE} verwendet. Die Ergebnisse der 2 mm dicken Ablagerung sind in Abbildung 67 links für die beiden Härten 76 H_{BE} und 143 H_{BE} dargestellt. Sie bestätigen die aus der letzten Untersuchungsreihe abgeleiteten Annahmen. Für alle Frequenzen ist die Abtragleistung bei der Härte von 143 H_{BE} im Vergleich zur Härte von 76 H_{BE} deutlich besser. Bei der 2 mm dicken Ablagerung zeigt sich dies schon bei der niedrigsten Frequenz (150 Hz), bei der ein Unterschied von über 40 % der Abtragleistung zwischen den beiden Härten festgestellt werden kann. Von der Ablagerung der Härte 143 H_{BE} werden bereits über 80 % entfernt. Die Abtragleistung steigt mit der Erhöhung der Frequenz von 150 Hz auf 210 Hz auf annähernd 100 %. Bei der Ablagerung der Härte 76 H_{BE} bewirkt die Erhöhung der Frequenz zwar ebenfalls

eine Verbesserung, jedoch liegt der größte Zuwachs der Abtragleistung (circa 25 %) bei einer Erhöhung der Frequenz von 150 Hz auf 180 Hz. Bei einer weiteren Erhöhung der Frequenz geht die Abtragleistung in einen degressiven Verlauf über und weist nur kleine Zuwachsraten von 5 % beziehungsweise 2 % auf.

Die Ergebnisse der 3 mm dicken Ablagerungsschicht sind in Abbildung 67 rechts dargestellt. Sie zeigen eine Verstärkung des bereits konstatierten Effekts. Aufgrund der dickeren Ablagerungen sind nun die Abtragleistungen mit allen Frequenzen deutlich geringer. Die sprödere Ablagerung der Härte 143 H_{BE} lässt sich unabhängig von der Frequenz um mindestens 20 % besser entfernen als die Ablagerung mit der größeren spezifischen plastischen Verformung der Härte 76 H_{BE}. Gut zu erkennen ist in dieser Untersuchungsreihe der Einfluss der Frequenz, der bei der Härte von 143 H_{BE} zu einer schrittweisen Steigerung der Abtragleistung auf bis zu 99 % führt.

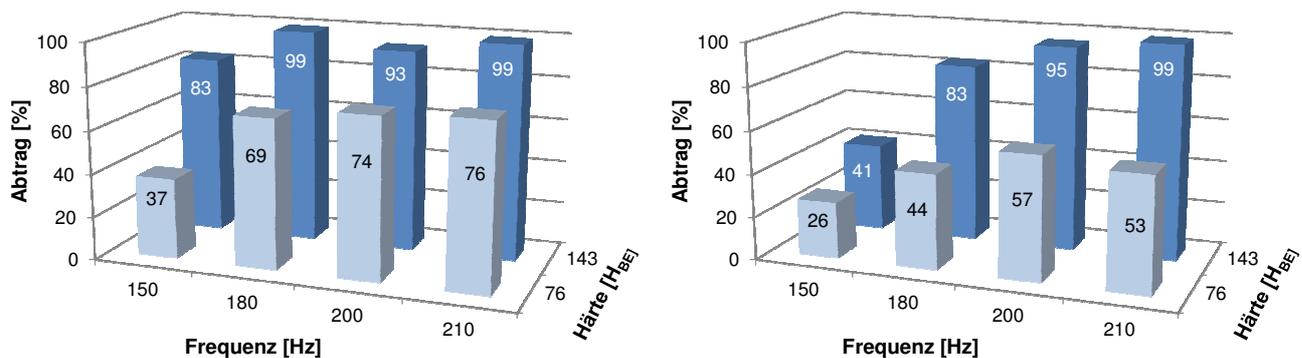


Abbildung 67: Einfluss der Härte bei einer Ablagerungsdicke von 2 mm (links) und einer Ablagerungsdicke von 3 mm (rechts)

Offensichtlich ist die vom Werkzeugträger zur Verfügung gestellte Schlagenergie ausreichend hoch, um bei den harten Ablagerungen (225 H_{BE} und 143 H_{BE}) einen Bruch zu erzeugen. Bei Ablagerungen mit kleinerer Härte (76 H_{BE}) wird die Bruchgrenze zwar auch überschritten, aber das Bruchverhalten ist vergleichsweise weniger spröde, wodurch die Abtragleistung geringer ausfällt.

Bei der Analyse der Kornfraktionen ist bei einer Ablagerungsdicke von 1 mm dieser Sachverhalt gut nachzuvollziehen. Mit zunehmender Härte steigt die Korngröße bei den betrachteten Frequenzen an. Der Bruch wird dadurch spröder und die Korngrößen steigen. Ähnliches Verhalten wurde auch bei der Kornfraktionsanalyse der Ablagerungsdicken von 2 mm und 3 mm festgestellt.

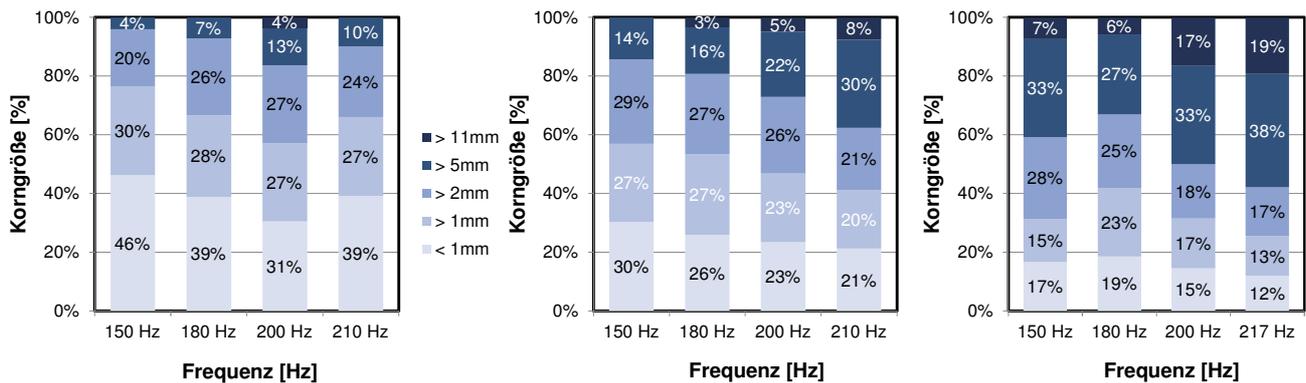


Abbildung 68: Kornfraktionen bei der Ablagerungsdicke von 1 mm und der Härten von 76 H_{BE} (links), 143 H_{BE} (Mitte) und 225 H_{BE} (rechts)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass harte beziehungsweise spröde Ablagerungen besonders gut durch das Schlagverfahren entfernt werden können. Unter den gegebenen Randbedingungen wurde bei den Ablagerungen größerer Härte eine Abtragleistung von annähernd 100 % erreicht. Auch in dieser Untersuchungsreihe zeigt sich, dass durch die Erhöhung der Frequenz die Effizienz der Abtragleistung zunimmt. Dies ist deutlich bei den Korngrößen des Abtragguts zu erkennen, die mit wachsender Frequenz größer werden. Durch die hohe Arbeitsleistung ist gleichzeitig auch eine Optimierung der Abtragleistung durch eine Anpassung weiterer Parameter (wie zum Beispiel des Vorschubs) gegeben. Anders als erwartet liegen die Herausforderungen bei Ablagerungen niedriger Härte. Aufgrund der größeren spezifischen Plastizität konnten diese Ablagerungen den Beanspruchungen besser widerstehen. Die Menge des Abtrags ist entsprechend geringer und erst die wiederholte Schlagbeanspruchung führt zu einem weiteren Abtrag.

6.2.4 Einfluss des Abstands zwischen Werkzeug und Ablagerungen

Das Beanspruchungsmodell hat, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, einen großen Einfluss des Abstands von 4 mm auf 1 mm gezeigt. Wird der Abstand verkleinert, so führt dies zu einer deutlichen Steigerung der Beanspruchungsamplitude beziehungsweise der Schlaghäufigkeit. Dabei nimmt in der übertragenen Beanspruchung auf das Rohr der Anteil hoher Schlagintensitäten deutlich zu. Entsprechend ist zu erwarten, dass auch die Abtragleistung zunimmt. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wird der Durchmesser des Werkzeugs vergrößert, während der Rohrinne Durchmesser konstant gehalten wird. Mit den Werkzeugdurchmessern 50 mm, 53 mm, 56 mm und 58 mm sowie einem Rohrinne Durchmesser von 62 mm ergeben sich daher die Abstände 6 mm, 4,5 mm, 3 mm und 2 mm. Zur Untersuchung der Wirkung dieses Einflussfaktors werden die Abtraguntersuchungen an einer 3 mm dicken Ablagerungsschicht mit

einer Härte von 76 H_{BE} durchgeführt. Diese Ablagerung wurde bereits im vorherigen Abschnitt berücksichtigt und hat sich aufgrund ihrer großen spezifischen Plastizität und Dicke als besonders schwer zu entfernen erwiesen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe sind in Abbildung 71 dargestellt.

Bei den Werkzeugdurchmessern von 50 mm und 53 mm und einer Frequenz von 150 Hz konnte wegen des großen Abstands und der geringen Dynamik des Werkzeugträgers kein signifikanter Abtrag festgestellt werden. Beim Vergrößern der Frequenz auf 180 Hz ist die Werkzeugdynamik so groß, dass eine Abtragleistung von 21 % beziehungsweise 28 % erreicht wurde. Nach der Vergrößerung des Durchmessers auf 56 mm war eine deutliche Steigerung der Abtragleistung festzustellen. Die Werkzeugdynamik war schon bei einer Frequenz von 150 Hz ausreichend, um eine Abtragleistung von 26 % zu erreichen. Entsprechend fällt die Abtragleistung bei den größeren Frequenzen von 180 Hz und 190 Hz noch größer aus. Im Vergleich zum Durchmesser von 53 mm ist hier eine Steigerung von 16 % und 21 % erzielt worden. Dieses Ergebnis zeigt deutlich den großen Einfluss des Abstands auf die Abtragleistung. Es ist daher zu erwarten, dass mit einer weiteren Reduzierung des Abstands auch die Abtragleistung weiter zunehmen wird. Deshalb wurde anschließend die Abtragleistung mit einem Werkzeugdurchmesser von 58 mm untersucht. Der sich daraus ergebende Abstand zur Rohrrinnenwand betrug nur 2 mm. Aufgrund der Ablagerungsschicht von 3 mm führte dies zu einer geometrischen Überschneidung von 1 mm zwischen Werkzeugdurchmesser und Ablagerungsoberfläche. Das Werkzeug konnte also nicht ohne Weiteres in das Rohr eindringen, da es stirnseitig mit den Ablagerungen in Kontakt gekommen wäre. Es wurde daher eine Modifizierung der Spitze des Werkzeugs in Form einer Schräge vorgenommen (vgl. Abbildung 69). Dadurch vergrößert sich der Werkzeugdurchmesser auf eine Länge von 50 mm von 53 mm auf 58 mm. Entsprechend wurden die Ablagerungen schrittweise, in Abhängigkeit vom Vorschub des Werkzeugträgers, durch einen Werkzeugdurchmesser von 53 mm auf 58 mm beansprucht. Mit einer Frequenz von 150 Hz und 180 Hz konnte der Abtragversuch nicht zu Ende geführt werden, da es zu einem Festsitzen des Werkzeugs im Rohr kam.

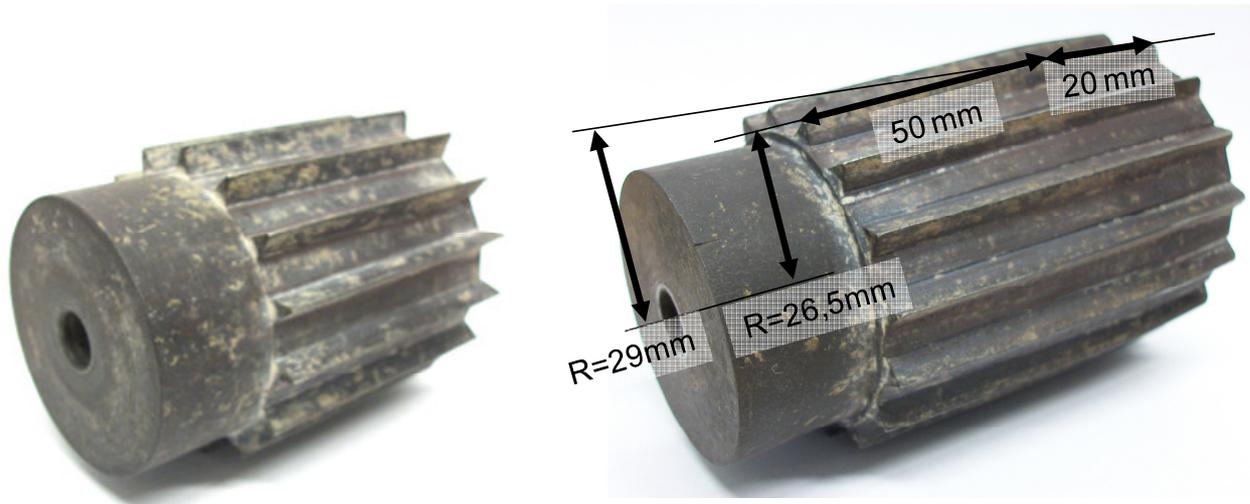


Abbildung 69: Werkzeug mit einem Durchmesser von 53 mm (links) und modifiziertes Werkzeug mit ansteigendem Durchmesser von 53 mm auf 58 mm

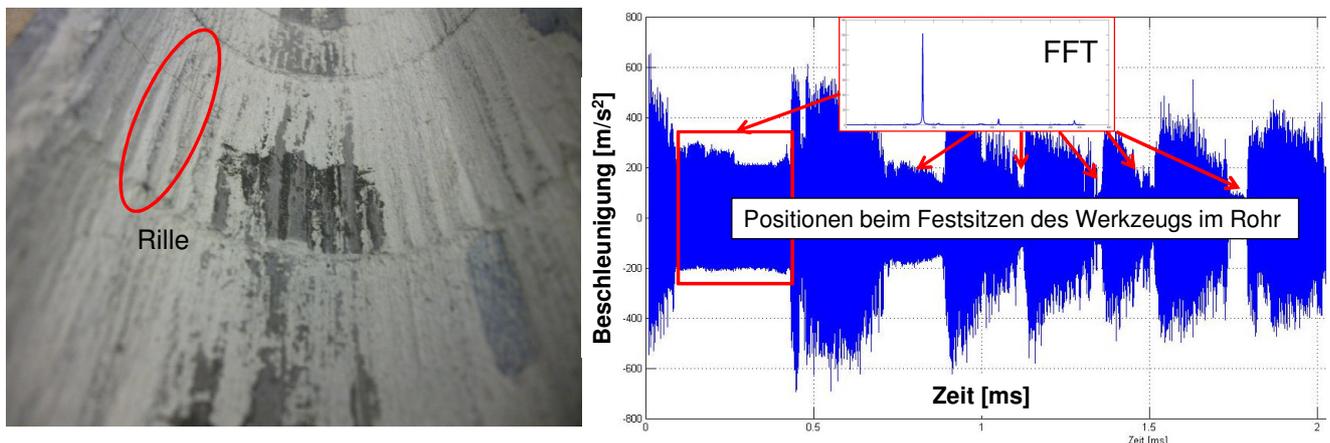


Abbildung 70: Abtragbild (links) und Schwingungen am Rohr (rechts) beim Feststecken des Werkzeugs im Rohr

In dem Abtragbild in Abbildung 70 links ist das Festsitzen des Werkzeugs durch die gebildeten Rillen in den Ablagerungen gut erkennbar. Die jeweiligen Werkzeugkanten schlugen sich in die Ablagerungen ein, ohne dass ein Abtrag stattfand. Der permanente Vorschub belastete das Werkzeug und verursachte das Festsitzen. Im Schwingungsbild des Rohrs sind diese Stellen deutlich zu erkennen. Das Rohr schwingt dabei mit der Anrefrequenz des Werkzeugs. Dieses Verhalten entspricht dem unteren Grenzbereich, der in Abschnitt 5.3.1 theoretisch ermittelt wurde. Die Ergebnisse bestätigen damit die theoretischen Überlegungen von Kapitel 5. Auch bei der höheren Frequenz von 190 Hz kam es zu einem Festsitzen des Werkzeugs. Dies trat immer dann auf, wenn der Vorschub nicht optimal gewählt war und der Abtragprozess im Verhältnis zum Vorschub zu langsam erfolgte. Letzterer wurde deshalb bei dieser Frequenz auf 5 mm/s reduziert. Die Ergebnisse wiesen eine Abtragleistung von 83 % auf.

Um zu zeigen, dass die Abtragung auch bei 10 mm/s mit diesem Werkzeug durchgeführt werden kann, wurde die Frequenz des Werkzeugträgers auf 210 Hz erhöht. Wie vermutet, konnte die größere Schlagintensität die Abtragleistung nun soweit verbessern, dass es zu keinem Festsitzen des Werkzeugs mehr kam. Damit konnte der Abtrag auch bei einem Vorschub von 10 mm/s und der schwer zu entfernenden Ablagerung mit einer Dicke von 3 mm bei einer Härte von 76 H_{BE}, mittels eines modifizierten Werkzeugs mit einer zuvor nicht erreichten Abtragleistung von 83 % realisiert werden. Die Ergebnisse in Abbildung 71 zeigen im Vergleich zum Durchmesser von 56 mm eine signifikante Steigerung des Abtrags um 32 % an.

Versuchsrandbedingungen	
Ablagerungshärte	76 H _{BE}
Vorschub	10 mm/s
Frequenzen	150/ 180/ 190/ 210 Hz
Ablagerungsdicke	3 mm
Ø Werkzeug	50/ 53/ 56/ 58 mm
Versuchsumfang	ca. 40 Rohre

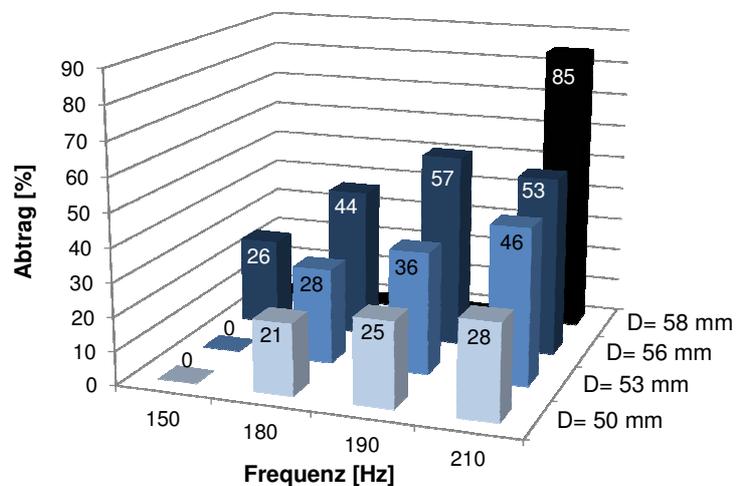


Abbildung 71: Einfluss des Abstands bei einer Ablagerung der Dicke von 3 mm, der Härte von 76 H_{BE} und eines Vorschubs von 10 mm/s

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Versuche den in Kapitel 5 vermuteten starken Einfluss des Abstands auf den Abtragvorgang bestätigt haben. Der Einfluss verdeutlicht die Beziehung von Ursache (Beanspruchung) und Wirkung (Abtragleistung). Je kleiner der Abstand, umso größer ist die Beanspruchung des Rohrs und damit die Abtragleistung. Die Untersuchungsreihe hat zudem gezeigt, dass das eingesetzte Werkzeug ein großes Optimierungspotential zur Steigerung der Effektivität des Abtragverfahrens hat. Zudem wurde gezeigt, dass der richtige Vorschub für einen erfolgreichen Abtrag entscheidend ist.

6.2.5 Einfluss der Drehung des Werkzeugträgers

In einer weiteren Untersuchungsreihe wurde der Einfluss der Drehung des Werkzeugträgers untersucht. Dessen Ursache wurde in Abschnitt 4.3.1 bereits beschrieben. Es wird angenommen, dass sich durch eine Drehmöglichkeit des Werkzeugträgers die

Kontaktwahrscheinlichkeit mit der Rohrwand erhöht, was eine positive Auswirkung auf den Abtragprozess bewirkt.

Die experimentellen Untersuchungen wurden an insgesamt 12 Rohren mit einer Ablagerungsdicke von 2 mm durchgeführt. Bei der Hälfte der Rohre wurde das Drehgelenk des Werkzeugträgers blockiert. Die Versuche wurden mit einer Frequenz von 190 Hz und einem Vorschub von 10 mm/s durchgeführt. Anders als bei den vorherigen Untersuchungen wurden die Versuche dieser Untersuchungsreihe nur zur Hälfte durchgeführt, um damit den Einfluss besser aufzeigen zu können. Beim Erreichen des Rohrendes wurde der Vorgang abgebrochen und der Werkzeugträger aus dem Rohr herausgezogen. Dies ermöglichte es, auch das Abtragbild im Rohr zur Bewertung heranzuziehen. Die Ergebnisse der Abtraguntersuchungen sind in Abbildung 72 dargestellt.

Der direkte Vergleich zeigt, dass im Mittel ein Unterschied von circa 8 % zu erkennen ist. Die Ursache für die bessere Abtragleistung liegt in der höheren Kontaktwahrscheinlichkeit des Werkzeugs, dass bei freier Drehung alle Stellen der Oberfläche im Rohrquerschnitt bearbeiten kann. Im Vergleich dazu erfolgt der Abtrag nur unmittelbar an den Stellen der Werkzeugkanten, wenn eine Drehung nicht möglich ist. Da der Wirkungsbereich der Werkzeugkanten genauso wie ihre Anzahl begrenzt ist, fällt der Abtrag entsprechend gering aus. Diese Annahmen konnten durch eine weitere Untersuchungsreihe verifiziert werden.

Obwohl verschiedene Rohre benutzt wurden, ist die mittlere Abtragleistung jeweils gleich groß (vgl. Abbildung 72). Die Ergebnisse zeigen daher auch die Robustheit des Verfahrens und die Genauigkeit der Randbedingungen des Versuchsstandes. Die Korngrößenanalyse in Abbildung 72 rechts zeigt zudem, dass bei der Drehung des Werkzeugs der Anteil an Feinstmaterial (Korngröße < 1 mm) vergleichsweise hoch ausfällt und der Anteil von Korngrößen über 5 mm vergleichsweise gering ist. Dafür ist ursächlich, dass bei der Drehung des Werkzeugs die Werkzeugspitze an unterschiedlichen Stellen der Ablagerungen eine Beanspruchung erfährt. Bei jedem Schlag auf eine unbearbeitete Rohrwandfläche entsteht, wie in Kapitel 2 erörtert, eine Zermalmungszone direkt unterhalb des Einschlagorts. Da dies bei freier Drehung sehr oft passiert, ist der Anteil an Feinstmaterial vergleichsweise groß. Hinzu kommt, dass ein möglicher oberflächennaher Abtrag des Materials tangential zur Oberfläche aufgrund der Drehbewegung nicht ausgeschlossen werden kann. Da keine aktive Drehung erfolgt, kann davon ausgegangen werden, dass die Abtragleistung aufgrund der Drehung des Werkzeugs vergleichsweise gering ist und sich vorwiegend aus Feinstmaterial zusammensetzt. Dass bei blockierter Drehung Ablagerungsstücke in größeren Korngrößen gefunden wurden, liegt daran, dass das Werkzeug

an derselben Stelle mehrmals auftraf (siehe auch Kapitel 2). Hier kam es aufgrund wiederholter Belastung zu einer Rissbildung, zu Risswachstum und schließlich zum Herausbrechen der Ablagerungsstücke.

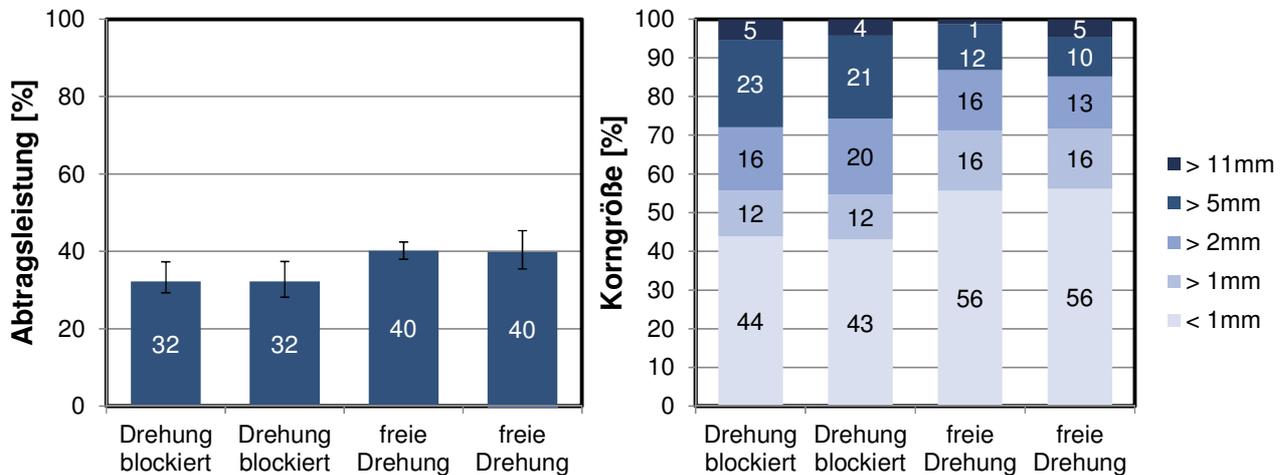


Abbildung 72: Abtragresultat (links) und Korngrößenanalyse (rechts) bei einer Frequenz von 190 Hz, einer Ablagerungsdicke von 2 mm und einer Ablagerungshärte von 76 H_{BE} für jeweils 3 Versuchsreihen

Das Abtragbild der beiden Untersuchungen ist in Abbildung 73 exemplarisch an einem Rohr dargestellt. Bei der freien Drehung des Werkzeugs ist eine gleichmäßige Bearbeitung der Ablagerungsoberfläche zu erkennen. Bei einer blockierten Drehung des Werkzeugs ist ein Abtrag an definierten Stellen – der Kontaktzone des Werkzeugs mit den Ablagerungen – auszumachen. Die dadurch entstandenen Bahnen bilden einen Steg und können so eine Führung des Werkzeugs gewährleisten. Daher sind im Abtragbild Bahnen zu erkennen, die einen vollständigen Abtrag im Rohrquerschnitt unmöglich machen. Deshalb ist zu erwarten, dass bei einem zu Ende geführten Versuch das Werkzeug sich in diesen Bahnen weiterbewegt und dadurch die Abtragleistung im Vergleich zur nicht blockierten Drehung des Werkzeugträgers weiter abfällt. Die hier dargestellten Ergebnisse des Abtragbildes lassen eine Abhängigkeit des Abtrags von der Werkzeuggeometrie erkennen. Durch eine andere Anordnung der Keile ist folglich ein anderes Abtragbild und damit auch ein differentes Abtragresultat zu erwarten. Die Variationsmöglichkeiten der Werkzeuggeometrie wurden in Abschnitt 4.2.2 diskutiert. Es ist davon auszugehen, dass hier noch ein großes Potential zur Verbesserung der Abtragleistung vorliegt.



Abbildung 73: Abtragbild mit freier Drehung (links) und blockierter Drehung (rechts) des Werkzeugträgers

Es konnte in dieser Untersuchungsreihe gezeigt werden, dass sich eine freie Drehung des Werkzeugträgers positiv auf den Abtragprozess auswirkt. Die Ursache liegt in der erhöhten Kontaktwahrscheinlichkeit des Werkzeugs mit den Ablagerungen, wenn es sich frei drehen kann. Dabei ändern sich die Kornfraktionen der herausgelösten Ablagerungen dahingehend, dass der Anteil an Feinstmaterial größer ausfällt.

6.3 Fazit zur experimentellen Abtraguntersuchung

Die experimentellen Untersuchungen haben die Ergebnisse des Beanspruchungsmodells verifiziert. Alle Ursachen für die Entwicklung des Abtragvorgangs konnten anhand des Beanspruchungsmodells erklärt werden. Am Beispiel der schwer zu entfernenden Ablagerung mit einer Dicke von 3 mm und einer Härte von 76 H_{BE} konnte darüber hinaus gezeigt werden, wie der Abtragprozess schrittweise optimiert werden kann. Grundsätzlich ist bei einer unbekanntem Abtragaufgabe zunächst erforderlich, Voruntersuchungen durchzuführen, in denen die Parametergrößen grob bestimmt werden. Anschließend kann deren Optimierung erfolgen, um das Abtragergebnis zu verbessern. Bei all diesen Schritten hilft das Beanspruchungsmodell dabei, die Zusammenhänge der Parameter und der Beanspruchung zu beschreiben und Möglichkeiten zur Beeinflussung der Beanspruchung aufzuzeigen.

Die Ergebnisse dieses Kapitels haben auch gezeigt, dass die größten Herausforderungen bei Ablagerungen auftreten, die eine vergleichsweise geringe Härte aufweisen. Dies ist gleichbleibend bei einer kleineren Druckfestigkeit und einer kleinen spezifischen Elastizität. Eine schlagende Beanspruchung kann bei dieser Art der Ablagerung besser aufgenommen werden, ohne dass ein Bruch auftritt. Daher ist eine höhere Schlaghäufigkeit erforderlich, um einen

vollständigen Abtrag zu ermöglichen. Unabhängig von der Härte nimmt der Beanspruchungsbedarf eines Abtrags mit der Ablagerungsdicke zu. Ablagerungen sind besonders schwer zu entfernen, wenn sie eine große Dicke und eine geringe Härte besitzen. Aus dem Beanspruchungsmodell kann für diese Randbedingung die passende Beanspruchung in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren hergeleitet werden. Generell wurde festgestellt, dass der Einflussfaktor Abstand eine große Rolle für den Abtragprozess spielt, weil die Schlaghäufigkeit mit abnehmendem Abstand deutlich ansteigt. Zudem vergrößert sich die Anzahl hoher Schlagintensitäten. Außer dem Abstand kann auch durch die Prozessgröße Frequenz die Schlagintensität vergrößert werden. Aufgrund der höheren Dynamik ist dies mit einer größeren Abweichung in der Schlagintensität verbunden. Im Beanspruchungsmodell hat sich dies durch eine größere Standardabweichung gezeigt. Es gibt ein Optimum für die Schlagintensität, welches erreicht ist, wenn es möglich ist, die Ablagerungen mit dem Werkzeug komplett zu durchdringen.

Des Weiteren haben die Ergebnisse gezeigt, dass bei allen Parameterkombinationen der Abtragprozess alleine durch die Dauer der Beanspruchung beziehungsweise durch einen kleinen Vorschub verbessert werden kann. Eine ausreichend lange Beanspruchungszeit führt bei jeder Form von Ablagerung schrittweise zu einem vollständigen Abtrag. Das Ziel der Abtragung ist jedoch, in einer gegebenen Beanspruchungszeit einen möglichst großen Abtrag zu erreichen. Die Korngrößenanalyse kann helfen, die optimalen Parameter zu finden. Je größer die Korngröße, umso effektiver ist der Abtragvorgang. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Werkzeuggeometrie, die im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande berücksichtigt wurde. Die Optimierung der Werkzeuggeometrie hängt in großem Maße von den Eigenschaften der Ablagerungen ab und muss daher ablagerungsspezifisch erfolgen. Das Ziel der Werkzeugoptimierung ist eine ideale Verteilung der Beanspruchung auf die gesamte Rohinnenfläche, um damit im Rohrquerschnitt einen gleichmäßige Abtrag zu ermöglichen. Dies wird zusätzlich durch einen Drehfreiheitsgrad des Werkzeugträgers begünstigt.

Die theoretischen Untersuchungen aus Kapitel 5 haben die Beanspruchung des Rohrs durch das Schlagverfahren in einem Modell erfasst. Dabei wurde die Beanspruchung ohne einen störenden Einfluss der Ablagerungen hergeleitet. Dadurch ist es mit dem Modell möglich, die tatsächliche Höhe der Beanspruchung in Abhängigkeit der Einflussfaktoren des Prozesse, der Werkzeuge und des Werkzeugträgers und unabhängig von den Einflussfaktoren der Ablagerungen mit einer hohen Genauigkeit vorherzusagen. In den experimentellen Untersuchungen in Kapitel 6 konnte dann durch die Berücksichtigung der Ablagerungen die Effektivität der Schlagverfahren aufgezeigt werden. In umfangreichen Abtraguntersuchungen

wurde dabei die durch das Modell theoretisch vorhergesagte Wirkung der Beanspruchung auf den Abtragprozess demonstriert. Der Abtragprozess lässt sich durch das Beanspruchungsmodell beschreiben und die Beeinflussung des Abtrags in Abhängigkeit der Einflussfaktoren wird aufgezeigt. Es kann daher abschließend gesagt werden, dass der theoretisch-experimentelle Ansatz dieser Arbeit richtig war, um den Abtragprozess zu erklären und die Wirkungen der Einflussmöglichkeiten durch die Parameter aufzuzeigen. Die in diesem Kapitel demonstrierte Vorgehensweise kann für beliebige Anwendungen herangezogen werden, um in Voruntersuchungen die erforderlichen Parameterkombinationen zu bestimmen. Aufbauend darauf können im zweiten Schritt die Parameter des Schlagverfahrens mit dem Ziel, einen vollständigen Abtrag der Ablagerungen zu erreichen, an die Abtragsaufgabe angepasst werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird zunächst eine Zusammenfassung über das Schlagverfahren für eine den Sekundärabfall minimierende Entfernung von Rohrablagerungen gegeben. Anschließend werden weitere Möglichkeiten zur Untersuchung des Schlagverfahrens aufgezeigt.

7.1 Zusammenfassung

Abtragverfahren für schwer zu entfernende und kontaminierte Rohrablagerungen basieren derzeit vor allem auf verschiedenen Strahlverfahren. Die große Menge der eingesetzten Hilfsstoffe ist nach dem Abtragprozess kontaminiert und führt zu der Problematik des Sekundärabfalls. Im Rahmen dieser Arbeit wurde systematisch nach alternativen Verfahren gesucht, die einen effektiven Abtragprozess ermöglichen. Es wurde hierzu zunächst die Bildung der kontaminierten Ablagerungen vorgestellt, dann auf die Charakteristika wie die Härte, Dicke und mineralogische Eigenschaften sowie die chemische Zusammensetzung der Ablagerungen eingegangen. Anschließend wurden derzeitige eingesetzte Verfahren zur Entfernung der Ablagerungen vorgestellt und die jeweiligen Vor- und Nachteile erklärt. Insbesondere wurde dabei auf den mechanischen Abtragprozess eingegangen, indem die bruchmechanischen Ursachen von Materialversagen anhand von verschiedenen Modellen aus der Literatur erläutert wurden. Nach der Bewertung und dem Vergleich unterschiedlicher Verfahrens- und Wirkprinzipien wurde ein Konzept für ein Abtragverfahren mittels definierter Schlagwirkung ausgewählt. Danach wurde eine Ausführungsform dieses Verfahrens entwickelt und die verschiedenen Teilsysteme analysiert, die schließlich in ein Gesamtkonzept überführt worden sind.

Der Abtragprozess wird bei diesem Schlagverfahren durch ein Werkzeug realisiert, das an einem hochfrequent schwingenden Werkzeugträger befestigt ist. Die Schwingungen werden durch einen im Werkzeugträgergehäuse gelagerten Rotor mit Unwucht erzeugt. Der Antrieb des Rotors befindet sich außerhalb des Werkzeugträgers. Hierbei überträgt ein Elektromotor die Drehzahl und das Drehmoment über eine flexible Welle zum Werkzeugträger. Durch diese Konstruktion sind der Werkzeugträger und das Werkzeug einfach und robust aufgebaut. Die Übertragung der Drehzahl und des Drehmoments erfolgt dabei über eine flexible Welle. Zusätzlich wurde ein Drehgelenk in der Schnittstelle zwischen Werkzeugträger und Welle eingebaut, sodass eine Drehbewegung des Werkzeugträgers infolge der taumelnden Bewegung entlang der Rohrinnefläche möglich ist und somit die Kontaktwahrscheinlichkeit des Werkzeugs mit der Rohrinnefläche erhöht ist. An der Spitze des länglich ausgeführten Werkzeugträgers ist der Werkzeugkopf angeschlossen. Die Geometrie dieses Werkzeugs ist aus länglich

angeordneten Keilen aufgebaut, die um den Werkzeugdurchmesser herum in gleichen Abständen angeordnet sind. Die Abtragung wird durch die sich im Rohr entwickelnde Dynamik des schwingenden Werkzeugträgers und des Werkzeugs hervorgerufen. Durch die permanente Beschleunigung des Werkzeugs kommt es zum Kontakt mit der Rohrinnenfläche und damit zur Übertragung des Schlagimpulses. Der Schlag auf die Ablagerungsoberfläche erzeugt dabei Risse in den Ablagerungen, die durch eine nachfolgende Beanspruchung zu einem Bruch und damit zum Abtrag der Ablagerungsschicht führen. Gleichzeitig wird der Werkzeugträger über eine Vorschubeinheit durch das Rohr bewegt und die Beanspruchung im Verlauf des Abtragprozesses auf die gesamte Rohrinnenfläche übertragen.

Um den Wirkmechanismus des Schlagverfahrens zu verstehen, wurde eine Faktorenanalyse durchgeführt und die Einflussfaktoren des Verfahrens bestimmt. Es wurden verschiedene Faktoren gefunden, die dem Werkzeugträger, dem Werkzeug, dem Prozess und den Ablagerungen zugeordnet werden können. Um die Wirkungen der einzelnen Einflussfaktoren auf die Rohrbeanspruchung zu ermitteln, wurde ein Versuchsstand konstruiert. Darin kann die Beanspruchung infolge der hochdynamischen Schlagwirkung des Werkzeugs in einem beliebigen Rohrstück näher untersucht werden. Die Messung der Wirkung der Schlagkraft wird dabei durch Scherkraftsensoren durchgeführt, die an der Rohraußenwand kraftschlüssig positioniert sind. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die Beanspruchung des Rohrs durch die drei unabhängigen Größen Schlagintensität, Schlaghäufigkeit und Schlagrichtung beschrieben werden kann. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Beanspruchung des Rohrs einer Normalverteilung folgt. Basierend darauf wurde ein Konzept erarbeitet, um die Beanspruchung des Rohrs in Abhängigkeit der Einflussfaktoren zu erfassen. Demnach kann die normalverteilte Beanspruchung des Rohrs durch die drei Größen Erwartungswert (Schlagintensität bei maximaler Schlaghäufigkeit), Beanspruchungsamplitude (maximale Schlaghäufigkeit) und Standardabweichung (Maß für die Unterschiedlichkeit der Schlagintensitäten) vollständig beschrieben werden.

Zur Erfassung der Wirkung des einzelnen Einflussfaktors auf die Beanspruchung wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt und die jeweilige Wirkung sowie vorhandene Wechselwirkungen der Faktoren untereinander erfasst. Die wichtigsten Einflussgrößen auf den Beanspruchungszustand sind die Frequenz des Werkzeugträgers, der Vorschub des Werkzeugs, der Abstand zwischen der Rohrinnenwand und dem Werkzeug sowie die Keilanzahl des Werkzeugs. Der Einflussfaktor Frequenz hat dabei einen großen Einfluss auf die Schlagintensität und darüber hinaus eine Wirkung auf die Standardabweichung und die Beanspruchungsamplitude. Der Vorschub des Werkzeugträgers entspricht der

Beanspruchungszeit des Werkzeugs im Rohr und beeinflusst damit lediglich die Beanspruchungsamplitude. Ein weiterer starker Einfluss auf die Beanspruchungsamplitude konnte bei dem Einflussfaktor Abstand nachgewiesen werden. Des Weiteren haben die Untersuchungen ergeben, dass die Beanspruchung in Abhängigkeit der Keilanzahl des Werkzeugs auf die Rohrinnefläche übertragen wird. Aus den Untersuchungen wurde dann der wechselwirkungsfreie Effekt jedes Einflussfaktors auf den Beanspruchungszustand ermittelt und durch Regressionsfunktionen beschrieben. Der funktionale Zusammenhang des Effekts konnte entweder durch einen linearen Ansatz oder durch eine Potenzfunktion beschrieben werden. Zum Schluss wurden die Effekte schrittweise zu einem Gesamtmodell zur Beschreibung der Beanspruchung zusammengesetzt. Das Modell berechnet in Abhängigkeit der Einflussfaktoren die Beanspruchung auf die Rohrinnefläche, die sich aus den unterschiedlichen Schlagintensitäten und den jeweiligen Schlaghäufigkeiten zusammensetzt. Mit dem Beanspruchungsmodell wurden damit die dynamischen und komplexen Beanspruchungen durch das Werkzeug mathematisch beschrieben und für weitere Untersuchungen zugänglich gemacht.

Um den Abtragprozess zu untersuchen und die Effektivität des Schlagverfahrens zu demonstrieren, wurde im letzten Teil dieser Arbeit ein realitätsnaher Prototyp des Schlagverfahrens aufgebaut. Um eine systematische und reproduzierbare Untersuchung der Ablagerungen zu ermöglichen, wurde Zementstein als Modellstoff eingesetzt, um die verschiedenen Eigenschaften der Ablagerungen nachzubilden. Zunächst wurden verschiedenen Mischungsvariationen hergestellt, die dann mittels einer Eindringhärtemessung nach der Härte und der spezifischen Plastizität sowie der einaxialen Druckfestigkeit charakterisiert wurden. Basierend auf diesen Untersuchungen wurden für den Modellstoff verschiedene Mischungen ausgewählt, die dann in Rohren von 2 m Länge eingebracht wurden und insgesamt sieben verschiedene Ablagerungstypen ergaben. Der Abtragprozess wurde danach anhand umfangreicher Untersuchungen mittels dieser Ablagerungen untersucht. Dabei wurde die Abtragleistung anhand der Menge der herausgelösten Ablagerungen und der Korngröße bewertet. Anders als erwartet haben die Ergebnisse gezeigt, dass eine harte und damit spröde Ablagerung mit großer Festigkeit und einem hohen Härtewert gut entfernt werden kann. Die Schlagwirkung des Werkzeugs ist dafür besonders gut geeignet, um einen Spröbruch in der Ablagerung zu erzeugen. Die Herausforderung lag hingegen bei den Ablagerungen geringer Festigkeit und relativ großer plastischer Verformung. Diese Art der Ablagerungen erweist sich für das Schlagverfahren vor allem in Verbindung einer vergleichsweise großen Ablagerungsdicke als besonders schwer zu entfernen. Im Rahmen der Abtraguntersuchungen konnte jeweils gezeigt werden, dass der Abtrag aufgrund der Beanspruchung hervorgerufen wird, die durch das

Beanspruchungsmodell beschrieben ist. Anhand des Beanspruchungsmodells konnten bei schwer zu entfernenden Ablagerungen der Dicke 3 mm und der Härte 76 H_{BE} Möglichkeiten zur Optimierung der Abtragleistung aufgezeigt werden. Zudem konnten die Wirkungen der Einflussfaktoren Ablagerungsdicke, Ablagerungshärte, Vorschub, Frequenz, Werkzeugdurchmesser und Werkzeugdrehung in verschiedenen Permutationen aufgezeigt werden.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass mithilfe der Abtraguntersuchungen die Effektivität des Schlagverfahrens bestätigt wurde und das Beanspruchungsmodell die Grundlage darstellt, um die Wirkungsweise des Verfahrens zu erklären und eine Optimierung der Abtragung vorzunehmen. Durch die Schlagwirkung des Verfahrens kann jede unter den gegebenen Randbedingungen dieser Arbeit vergleichbare Art von Ablagerung durch eine ausreichend hohe Beanspruchung entfernt werden.

7.2 Ausblick

Das Abtragverfahren mittels Schlagwirkung bietet ein großes Potential zur Verbesserung der Effizienz an. Bisher wurden die Parametergrößen vor dem Abtragprozess eingestellt und der Abtrag mit diesen Parametern durchgeführt. Die Ablagerungen in der Rohrleitung wurden mit der gleichen Intensität beansprucht. Bei richtiger Parameterauswahl können die Ablagerungen zwar effektiv entfernt werden, jedoch ist der Prozess dadurch an sich nicht unbedingt effizient. Aufgrund der ungleichmäßigen Natur einer Ablagerungsschicht sollte die Intensität der Beanspruchung idealerweise an die Erfordernisse angepasst erfolgen. Dies bedeutet, dass die Prozessparameter wie die Frequenz oder der Vorschub in Abhängigkeit der Abtragleistung und während des Abtragprozesses verändert und kontinuierlich angepasst werden. Hierzu ist es erforderlich, dass die Abtragleistung während des Betriebs gemessen und erfasst wird. Beispielsweise kann dies direkt durch die Messung des Massenstroms erfolgen. Ein Absinken des Massenstroms bedeutet dann, dass die Ablagerungen entfernt worden sind und eine Erhöhung des Vorschubs erfolgen kann, um die Bearbeitung des nächsten Rohrquerschnitts vorzunehmen. Entsprechend kann dann die Regelung der Schlagintensität durch die Veränderung der Frequenz vorgenommen werden. Dadurch kann die Belastung des Rohrs, des Werkzeugs und des Werkzeugträgers reduziert werden. Für die Ermittlung der Abtragleistung ist es zweckmäßig, wenn diese in Echtzeit erfolgt, sodass die Beanspruchungsparameter unmittelbar angepasst werden. Die Messung der Abtragleistung kann auch durch den Werkzeugträger erfolgen. Beispielsweise können optische Sensoren oder Tastsensoren im Werkzeugträger integriert werden, die den Abtrag auf der Rohrinnenfläche messen. Eine indirekte Möglichkeit zur Erfassung der Abtragleistung stellt die Überwachung der freien

Drehung des Werkzeugträgers dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass die freie Drehung zunimmt, sobald der Widerstand durch die Ablagerungen nicht mehr gegeben ist. Eine Überwachung der Drehzahl kann daher Rückschlüsse auf die Abtragsmenge beziehungsweise Abtragleistung erlauben. In folgenden Arbeiten können daher diese Möglichkeiten zur Erfassung der Abtragleistung und zur Regelung des Abtragprozesses näher untersucht werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit haben aufgezeigt, dass der Abtrag vorzugsweise mit einem großen Werkzeugdurchmesser und damit mit einem kleinen Abstand zwischen dem Werkzeug und der Rohrwand erfolgen soll. Dabei besteht allerdings die Gefahr, dass ein Festsitzen des Werkzeugträgers auftreten kann. Das Feststecken des Werkzeugträgers ist ein Indiz für das Vorliegen einer schwer zu entfernenden Ablagerung oder eines nicht optimal angepassten Parameters. Auch bei diesem Beispiel kann eine Regelung des Abtragprozesses weiterhelfen. Beispielsweise kann eine Umkehr beziehungsweise eine Anpassung des Vorschubs mit gleichzeitiger Anpassung der Schlagintensität das Problem lösen. Damit ist eine Möglichkeit für eine konzentrierte und zielgerichtete Erhöhung des Beanspruchungszustandes gegeben, um einen partiellen Abtrag einer schwer zu entfernenden Ablagerungsschicht zu ermöglichen.

Die Geometrie des Werkzeugs und des Werkzeugträgers wurde nur in einem kleinen Umfang untersucht, da sie sonst den Rahmen dieser Arbeit überschritten hätte. Sie besitzt jedoch ein großes Potential für weitere Verbesserungen des Abtragprozesses und der Steigerung der Effizienz. Die verschiedenen Einflussgrößen, die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt wurden, erlauben daher eine Vielfalt an Variationsmöglichkeiten, die in weiteren Arbeiten untersucht werden können. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der Anwendungsgrenze des Schlagverfahrens. Grundsätzlich kann das Wirkprinzip des Schlagverfahrens bei jeder schwer zu entfernenden Ablagerung eingesetzt werden. Hierbei können jedoch aufgrund konstruktiver Restriktionen die Grenzen des Schlagverfahrens erreicht werden. Vorstellbar ist dies, wenn die Rohre einen sehr kleinen Durchmesser besitzen, die dann eine Miniaturisierung des Schlagverfahrens erforderlich machen. Es ist daher zu prüfen, inwieweit die Wirksamkeit des Schlagverfahrens durch konstruktive Gestaltung gegeben ist. Ähnlich ist es auch bei zu großen Rohrdurchmessern. Auch hier kann eine konstruktive Neugestaltung des Schlagverfahrens erforderlich sein.

Das im Rahmen dieser Arbeit aufgestellte Beanspruchungsmodell kann als Grundlage für weitere Untersuchungen herangezogen werden. Beispielsweise kann bei einer virtuellen Verfahrensuntersuchung, wie zum Beispiel einer FEM-Simulation, die prognostizierte Beanspruchung des Modells als Eingangsgröße dienen, um den Abtragprozess numerisch zu untersuchen. Ferner kann die Vorgehensweise zur Erstellung des Beanspruchungsmodells als

ein Beispiel für die Erfassung einer vergleichbaren dynamischen und komplexen Beanspruchung herangezogen werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Rohre mit kontaminierten Ablagerungen aus der Erdgasförderung in Norddeutschland	2
Abbildung 2:	Zerfallskette von Uran 238 (links) und Thorium 232 (rechts) [Smi-92] [Amb-12]	7
Abbildung 3:	Verlauf der Ablagerungsdicke und Ablagerungsdichte in Abhängigkeit der Sondentiefe gemäß [Gel-06] und Bild einer kontaminierten Ablagerungsschicht aus einer Förderstelle für Erdgas in Norddeutschland	11
Abbildung 4:	Dekontamination von Rohren mittels Hochdruckwasserstrahlverfahren [Var-10]	14
Abbildung 5:	Riss im Material, Rissumgebung und Energieverteilung [Gri-21] [Gro-11]	20
Abbildung 6:	Rissöffnungs- und Beanspruchungsarten (Mode I reine Normalbeanspruchung, Mode II ebene Scherbeanspruchung, Mode III nichtebene Scherbeanspruchung)	21
Abbildung 7:	Modell für eine elastisch-plastische Eindringung [Law-75] [Che-06]	24
Abbildung 8:	Ausbildung eines lateralen Risses und Herauslösen von Bruchstücken bei einer punktförmigen Belastung [Law-75]	25
Abbildung 9:	Fragmentierungsprozess unter Einsatz eines senkrecht angreifenden Werkzeugs [Geh-97]	26
Abbildung 10:	Fragmentierung unter Einsatz eines parallel zur Oberfläche angreifenden Werkzeugs [Zip-89]	27
Abbildung 11:	Symboldarstellungen von Abtragverfahren (von links nach rechts): Oscilating Disc Cutter (ODC), Warzenrolle, Drehschlagbohren, Schneiddiske, Rundschafftmeißel	32
Abbildung 12:	Vereinfachtes Modell eines Rohrstücks mit einer Ablagerungsschicht, einem Haftverbund und den Möglichkeiten zur Einbringung von Kräften zur Zerstörung des Stoffsystems	41
Abbildung 13:	Gittermodell zur Veranschaulichung der Wirkmechanismen von Abtragverfahren, von links: a) Schichtweises Zerstören der Ablagerungen, b) Zerstören des Haftverbundes, c) Zerstören der Ablagerungen durch senkrechtliches Eindringen, d) Zerstören durch Dehnung im Trägermaterial	42

Abbildung 14:	Schnittstellen beim Abtrag durch Schlagbeanspruchung	49
Abbildung 15:	Betrachtung des Ortes der Funktionserfüllung	50
Abbildung 16:	Berechnungsmodell für einen Werkzeugträger mit Unwucht (links) und wirkende Kräfte auf das Gehäuse mG im Freischnitt (rechts)	54
Abbildung 17:	Schematische Abtragsequenz:: Ansicht von vorne und von der Seite	58
Abbildung 18:	HMS-System des Herstellers Wacker Neuson und CAD-Modell des Werkzeugträgers bestehend aus Gehäuse (blau), Unwucht (orange) und Gelenk (gelb)	60
Abbildung 19:	Versuchseinrichtung (links), Einfluss der Frequenz über die Beschleunigung (Mitte) und Verlauf der Beschleunigung über die Werkzeugträgerlänge (rechts)	62
Abbildung 20:	Bewegungsformen des Werkzeugträgers zu unterschiedlichen Zeitpunkten außerhalb des Rohrs (links) und innerhalb des Rohrs (rechts)	66
Abbildung 21:	Werkzeuggeometrie mit $d = 56$ mm (von links): längs, schraubenförmig und quer zur Werkzeugachse angeordnete Keilformen. Bild rechts: Bruch von Werkzeugkanten aufgrund eines kleinen Keilwinkels	67
Abbildung 22:	Abschätzung der erforderlichen Kantenanzahl bei gegebenem Radius, Keilwinkel und Keilhöhe des Werkzeugs	69
Abbildung 23:	Einflussmatrix mit Parametern des Schlagverfahrens	74
Abbildung 24:	Vorgehensweise zur Modellierung des Beanspruchungszustandes	79
Abbildung 25:	Gesamtbild des Versuchsstandes (links), der Einspannung (Mitte) und Aufnahme mit Sensoren und Rohr (rechts)	81
Abbildung 26:	Darstellung der auftretenden Kräfte im Versuchsstand beim Schlag auf einen Sensor	82
Abbildung 27:	Werkzeuge mit unterschiedlicher Keilanzahl	86
Abbildung 28:	Kraftverlauf der Scherkraftsensoren während eines Versuchs	89
Abbildung 29:	Schlagverteilung für eine Werkzeugkante mit charakteristischen Werten und QQ-Plot für eine Frequenz von 190 Hz	92
Abbildung 30:	Vorgehensweise zur Ermittlung der kinetischen Energie des Werkzeugträgers beim Einschlag	97
Abbildung 31:	Kraftverlauf beim Einschlag des Werkzeugs auf die Rohrrinnenwand, gemessen an der Rohraußenwand	98

Abbildung 32:	Verlauf der Kräfte beim Aufschlag einer Masse von 0,4 kg (links) und bei einer Masse von 0,8 kg (rechts)	101
Abbildung 33:	Verlauf der Beschleunigung und der Geschwindigkeit für verschiedene Frequenzen (links) sowie Mittelwerte von Kraftverläufen unterschiedlicher Schlagintensitäten (rechts)	102
Abbildung 34:	Untersuchungsgrößen für die Aufstellung des Beanspruchungsmodells	104
Abbildung 35:	Berechnung des Effektes einer Einflussgröße auf zwei Stufen [Kle-08]	105
Abbildung 36:	Schlagbild bei unterschiedlichen Frequenzen (links) und Einfluss der Frequenz auf Erwartungswert, Standardabweichung und Gesamtschlagzahl (rechts)	106
Abbildung 37:	Einfluss der Zeit auf die Beanspruchung bei der Frequenz von 190 Hz (links) und Verlauf der Beanspruchungsamplitude für unterschiedliche Frequenzen (rechts)	108
Abbildung 38:	Einfluss der Vorspannkraft (links) und eines Kraftverlaufs bei zwei Vorspannungen (rechts)	110
Abbildung 39:	Einfluss der außermittigen Zentrierung des Werkzeugs	112
Abbildung 40:	Einfluss auf Standardabweichung, Erwartungswert und Beanspruchungsamplitude	113
Abbildung 41:	Einfluss des Abstands auf den Erwartungswert, die Standardabweichung und Beanspruchungsamplitude	115
Abbildung 42:	Qualitativer Schlagverlauf für eine Werkzeugkante sowie Gesamtschlagverlauf für ein Werkzeug mit vier Keilen und theoretisch maximaler Schlagzahl	117
Abbildung 43:	Beanspruchungszustand für ein Werkzeug mit unterschiedlichen Keilen bei einer Frequenz von 150 Hz	119
Abbildung 44:	Einfluss der Keilanzahl auf den Beanspruchungszustand bei der Untersuchung eines Werkzeugs mit zwei, vier und acht Keilen	120
Abbildung 45:	Schlagverteilung bezogen auf einen Keil bei unterschiedlicher Keilanzahl	121
Abbildung 46:	Gesamtmodell zur Beschreibung des Beanspruchungszustandes im Rohr	131
Abbildung 47:	Beziehung zwischen Schlagintensität und Kraftstoß und Geschwindigkeit beim Schlag	133
Abbildung 48:	Beanspruchungszustand für ein Werkzeug mit vier Kanten und	135

	unterschiedlichen Frequenzen	
Abbildung 49.	Beanspruchungszustand für ein Werkzeug mit acht Kanten und unterschiedlichen Frequenzen	135
Abbildung 50:	Beanspruchungszustand für einen Abstand von 1 mm (links) und 4 mm (rechts)	136
Abbildung 51:	Beanspruchung für eine Zeitdauer von 20 s (links) und 30 s (rechts)	136
Abbildung 52:	Beanspruchung durch ein Werkzeug mit 16 Kanten und einen Abstand von 3 mm in Abhängigkeit unterschiedlicher Frequenzen	137
Abbildung 53:	Beanspruchung durch ein Werkzeug mit 16 Kanten und einen Abstand von 2 mm in Abhängigkeit unterschiedlicher Frequenzen	138
Abbildung 54:	Beanspruchung durch ein Werkzeug mit 16 Kanten, einer Frequenz von 100 Hz und einen Abstand von 2 mm in Abhängigkeit von einer unterschiedlichen Beanspruchungszeit	139
Abbildung 55:	Kennwerte eines Kraft-Eindringtiefe-Diagramms bei der Bestimmung der Brinellhärte an zementgebunden Stoffen	144
Abbildung 56:	Verlauf der Härteentwicklung an Zementstein (links) und Verlauf der spezifisch plastischen Verformung bis 28 Tage (rechts)	146
Abbildung 57:	Einbringen der Ablagerungen in Rohrhälfte (links), gleichmäßige Verteilung der Ablagerungen durch die Drehung des Rohrs (Mitte) und nachgebildete Ablagerung im Rohr der Länge von 2 m (rechts)	149
Abbildung 58:	Einspannvorrichtung, Saugstutzen und Saugeinheit	150
Abbildung 59	Vorschubeinheit	151
Abbildung 60:	Kornfraktionen des Abtragguts	153
Abbildung 61:	Versuchsplan und Einfluss der Ablagerungsdicke auf die Abtragleistung	155
Abbildung 62:	Verteilung der Korngrößen bei Ablagerungsdicken von 1 mm (links) und 3 mm (rechts)	157
Abbildung 63:	Partiell vorhandene Ablagerung nach einem Abtragversuch	159
Abbildung 64:	Versuchsplan und Einfluss des Vorschubs auf die Abtragleistung bei einer Ablagerungsdicke von 1 mm und einer Härte von 76 HBE	160
Abbildung 65:	Einfluss des Vorschubs bei einer Ablagerungsdicke von 2 mm und einer Härte von 76 HBE (links) bzw. einer Härte von 143 HBE (rechts)	161
Abbildung 66:	Einfluss der Härte bei einer Ablagerungsdicke von 1 mm	163

Abbildung 67:	Einfluss der Härte bei einer Ablagerungsdicke von 2 mm (links) und einer Ablagerungsdicke von 3 mm (rechts)	164
Abbildung 68:	Kornfraktionen bei der Ablagerungsdicke von 1 mm und der Härten von 76 HBE (links), 143 HBE (Mitte) und 225 HBE (rechts)	165
Abbildung 69	Abbildung 69: Werkzeug mit einem Durchmesser von 53 mm (links) und modifiziertes Werkzeug mit ansteigendem Durchmesser von 53 mm auf 58 mm	167
Abbildung 70:	Abtragbild (links) und Schwingungen am Rohr (rechts) beim Feststecken des Werkzeugs im Rohr	167
Abbildung 71:	Einfluss des Abstands bei einer Ablagerung der Dicke von 3 mm, der Härte von 76 HBE und eines Vorschubs von 10 mm/s	168
Abbildung 72	Abtragergebnis (links) und Korngrößenanalyse (rechts) bei einer Frequenz von 190 Hz, einer Ablagerungsdicke von 2 mm und einer Ablagerungshärte von 76 HBE für jeweils 3 Versuchsreihen	170
Abbildung 73:	Abtragbild mit freier Drehung (links) und blockierter Drehung (rechts) des Werkzeugträgers	171
Abbildung 74:	Darstellung der Kräfte bei einem Schlag zwischen zwei Sensoren	XIX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spezifische Aktivität von Rückständen aus der Erdöl-/Erdgasförderung gemäß [Gel-03]	8
Tabelle 2:	Kraft-Eindringtiefe-Beziehungen für unterschiedliche Geometrien bei einem elastischen Material	23
Tabelle 3:	Einteilung von Abtragverfahren nach Krafrichtung, Kraftwirkung und Krafteinbringung	30
Tabelle 4:	Nutzwertanalyse für die Bewertung von Verfahrensprinzipien	39
Tabelle 5:	Nutzwertanalyse zur Bewertung von Abtragmechanismen	45
Tabelle 6:	Wirkflächen und deren Funktionen	51
Tabelle 7:	Parameter eines Keils als Werkzeuggeometrie anhand einer schematischen Darstellung	57
Tabelle 8:	Messung und Berechnung der Beschleunigung für unterschiedliche Frequenzen	62
Tabelle 9:	Einflussmatrix	73
Tabelle 10:	Variation der Frequenz	84
Tabelle 11:	Beziehung zwischen der Beanspruchungszeit und dem Vorschub bei einer Werkzeugkantenlänge von 50 mm	84
Tabelle 12:	Rohrabmessungen und Abstand zwischen der Rohrrinnenwand und einem Werkzeug mit dem Durchmesser von 56 mm	85
Tabelle 13:	Parameter und Untersuchungsgrößen	87
Tabelle 14:	Bestimmung des Verlustanteils für unterschiedliche Schlagintensitäten	104
Tabelle 15:	Beanspruchungszustand in Abhängigkeit der Frequenz	124
Tabelle 16:	Berechnung des Effekts durch Mittelwertbildung auf zwei Frequenzniveaus	125
Tabelle 17:	Beanspruchungszustand in Abhängigkeit der Frequenz und des Abstands	127
Tabelle 18:	Fallunterscheidung zur Berücksichtigung des Abstands in der Beanspruchungsamplitude	128
Tabelle 19:	Stärke der einzelnen Parameter auf die Beanspruchungsgrößen	131
Tabelle 20:	Konstanten der Beanspruchungsparameter	132

Tabelle 21:	Korrekturfaktoren für die Beanspruchungsparameter	132
Tabelle 22:	Parameter des Modellstoffs für die Nachbildung der Ablagerungen	148
Tabelle 23:	Bei der Erdgas- und Erdölförderung eingesetzte Rohre [Iso-10]	148
Tabelle 24:	Ablagerungstypen für die experimentellen Untersuchungen	152
Tabelle 25:	Variationsbereiche der untersuchten Parameter	152
Tabelle 26:	Einfluss der Frequenz	XX
Tabelle 27:	Einfluss der Frequenz	XX
Tabelle 28:	Einfluss der Beanspruchungszeit	XXI
Tabelle 29:	Einfluss der Beanspruchungszeit	XXI
Tabelle 30:	Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 150 Hz und Werkzeug (zwei Keile)	XXII
Tabelle 31:	Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 180 Hz und Werkzeug (zwei Keile)	XXII
Tabelle 32:	Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 190 Hz und Werkzeug (zwei Keile)	XXIII
Tabelle 33:	Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 150 Hz und Werkzeug (vier Keile)	XXIII
Tabelle 34:	Einfluss Keilanzahl der Frequenz 180 Hz und Werkzeug (vier Keile)	XXIV
Tabelle 35:	Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 190 Hz und Werkzeug (vier Keile)	XXIV
Tabelle 36:	Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 150 Hz und Werkzeug (acht Keile)	XXV
Tabelle 37:	Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 180 Hz und Werkzeug (acht Keile)	XXV
Tabelle 38:	Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 190 Hz und Werkzeug (acht Keile)	XXVI
Tabelle 39:	Einfluss des Abstands	XXVI
Tabelle 40:	Gesamtversuchsplan der experimentellen Untersuchungen	XXVIII
Tabelle 41:	Einfluss der Ablagerungsdicke	XXIX
Tabelle 42:	Einfluss des Vorschubs	XXIX
Tabelle 43:	Einfluss des Vorschubs	XXX
Tabelle 44:	Einfluss des Vorschubs	XXX
Tabelle 45:	Einfluss der Härte	XXX
Tabelle 46:	Einfluss der Härte	XXXI
Tabelle 47:	Einfluss der Härte	XXXI
Tabelle 48:	Einfluss des Abstands	XXXI
Tabelle 49:	Einfluss der Drehung	XXXII

Literaturverzeichnis

- [Ali-10] Thomas Alink: „Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz“, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010
- [Amb-12] Ambos, F., Gese, C., Aminy, A. (2012). "Neue Verfahrenstechnik zur Dekontamination und Probenahme in Rohrleitungen mittels Vibrationstechnik" , Schlussbericht zum Forschungsvorhaben, Erschienen als Report in der Technische Informationsbibliothek, Hannover 2012
- [Ami-11] Aminy, A. (2011). "Dekontamination von Rohrleitungen mittels Vibration", Kurzvortrag, Postersession und Artikel im Tagungsband, Kontec 2011, Dresden.
- [Ami-12] Aminy, A., Gentes, S., Ambos, F. (2012). "Dekontaminationsverfahren für Rohrleitungen", Beitrag in der Zeitschrift: ATW, International Journal for Nuclear Power, 2012, S. 255-261
- [Ami-10] Aminy, A., Gentes, S., Ambos, F. (2010). "Decontamination of Tubings Using Vibration Technology", Beitrag im Tagungsband, Conference of the American Nuclear Society, Decommissioning, Decontamination & Reutilization, Idaho, Aug. 29 – Sept. 2, 2010, USA
- [Ast-07] ASTM E2546-07, "Standard Practice for Instrumented Indentation Testing" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/E2546-07, 2007
- [Bac-03] W. Bach: „Entwicklung und Qualifizierung neuer Zerlege- und Dekontaminationstechniken für den Rückbau von Forschungsreaktoren unter dem Gesichtspunkt der Kostenminimierung“, bmbf Abschlußbericht (02S7758) Universität Hannover, Hannover 2003, pp. 55-60
- [Bad-07] Amer Badr M. B. Merdhah: „The study of scale formation in oil resevoir during water injection at high-barium and hig-salinity formation water“, Universiti Teknologi Malaysia, 2007
- [Bog-07] BOGUSLAW MICHALIK: „Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (TENORM) in Non-Nuclear Industry and Their Impact Into Environment and Occupational Radiation Risk“, Springer, 2007, pp.359-372, ISBN: 978-1-4020-6333-6
- [Bru-05] Michael S. Bruno: Fundamental Research on Percussion Drilling: Improved rock mechanics analysis, advanced simulation technology, and full-scale laboratory investigations, Technical Report, Terralog Technologies Inc. pp. 2005
- [Car-97] G. Caré, A.C. Fischer-Cripps: "Elastic-Plastic indentation stress fields using the

- finite-element method", Journal of material Science 32, pp. 5653-5659, 1997
- [Cra-99] Mike Crabtree et al.: "Fighting Scale-Removal and Prevention", Oilfield Review, Autumn 1999, pp. 30-45
- [Che-06] L.H. Chena, J.F. Labuzb: Indentation of rock by wedge-shaped tools, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43, pp.1023-1033, 2006
- [Dag-86] Ralph B. D'Agostino, Michael A. Stephens: „Goodness-of-fit Techniques“, 1986, ISBN 0-8247-7487-6
- [Doa-09] Mai-Linh Doan, Gérard Gary: „Rock pulverization at high strain rate near the San Andreas fault“, Nature Geoscience, Vol.2, 2009
- [Dre-05] Hans Dresig: „Schwingungen mechanischer Antriebssysteme, Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese“, 2. Auflage, Springer, Auerswalde 2005, ISBN 3-540-26024-2
- [Dvg-10] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V (DVGW): „Optimierte Spülpläne für Trinkwassernetze“, DVGW Technologie Report Nr. 2/10, Bonn 2010
- [Eva-66] Ivor Evans, C.D. Pomeroy: „The Strength, Fracture and Workability of Coal, A Monograph on Basic Work on Coal Winning“ Mining Research Establishment, pp. 184-194, London 1966
- [Gel-03] Rainer Gellermann et. al.: „Mengenaufkommen an NORM-Rückständen für das deutsche Entsorgungskonzept“, Abschlussbericht (SR 2416), Bundesamtes für Strahlenschutz, Bonn 2003
- [Gel-06] Rainer Gellermann et. al.: „Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten und Erweiterung des Anwendungsbereichs“, Abschlussbericht (StSch 4416), Bundesamt für Strahlenschutz, Nordhausen 2006
- [Geh-97] Karlheinz Gehring: „Classification of Drillability, Cuttability, Borability and Abrasivity in Tunnelling“, Felsbau Nr. 15, pp. 183-191, 1997
- [Ger-75] Marion Gerson: „The Techniques and Uses of Probability Plotting“, Journal Of The Royal Statistical Society. Series D (The Statistician), Vol. 24, No. 4, pp. 235-257, 1975
- [Gri-21] Alan Arnold Griffith: “The phenomena of rupture and flow in solids”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, Vol. 221, London 1921, pp. 163-198
- [Gro-09] Dietmar Gross, Werner Hauger, Walter Schnell, Jörg Schröder, Wolfgang A. Wall: „Technische Mechanik: Band 3: Kinetik“, 10. Auflage, Springer, Darmstadt, Essen und München 2009, ISBN: 978-3-642-11263-8

-
- [Gro-11] Dietmar Gross, Thomas Seelig: „Bruchmechanik“, 5. Auflage, Springer, ISBN 978-3-642-10196-0, pp.53-55, 2011
- [Ham-08] Fauzi Hmid: „Recent Advance: Scale Formation in Oil Reservoir during water injection“, Universiti Teknologi Malaysia, 2008 ISBN 978-983-52-0594-1
- [Han-71] Hans Georg Hahn: „Mechanik der Brucherscheinungen in festen Körpern“, Zeitschrift Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Volume 2, Issue 1, München 1971
- [Han-12] Hans Albert Richard, Manuela Sander: „Ermüdungsrisse“, Springer Vieweg, Paderborn 2012, ISBN: 978-3-8348-1594-1
- [Hoo-00] M. Hood, H. Alehossein: „A development in rock cutting technology“, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Nr. 37, pp. 297-305, 2000
- [Iso-02] Metallische Werkstoffe - Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter - Teil 1: Prüfverfahren (ISO 14577-1:2002); Deutsche Fassung EN ISO 14577-1, 2002
- [Iso-10] DIN EN ISO 13680 D, Erdöl- und Erdgasindustrie – Nahtlose Rohre aus korrosionsbeständigen Legierungen zur Verwendung als Futter- oder Steigrohre sowie Muffenvorrohre – Technische Lieferbedingungen, 2010
- [Kle-08] Wilhelm Klepmann, „Taschenbuch Versuchsplanung, Produkte und Prozesse optimieren“, 5. Auflage; 2008 Carl Hanser Verlag München, Wien 2008
- [Kel-09] Malcom A. Kelland: „Production chemicals for the Oil and Gas Industry“, CRC Press, 2009, ISBN: 978-1-4200-9297-4
- [Kle-07] Bernd Klein: „Versuchsplanung - DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik“, 2. Auflage, Wissenschaftsverlag GmbH, ISBN 978-3-486-58352-6, Oldenburg, 2007
- [Kle-10] Norbert Klein: „Complex – Das Impulsspülverfahren für Industrieanwendungen“, Eine Information der Hammann Wasser-Kommunal GmbH, Annweiler am Trifels 2012
- [Kol-85] W.A. Kolb and M. Wojcik: “Enhanced Radioactivity due to Natural oil and gas Production and related Radiological Problems”, The Science of the Total Environment 45, (1985) pp. 77-84
- [Kol-02] Thomas Kollmann: „Schwingungsinduziertes Fließen feinstkörniger, kohäsiver Pulver“, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1967
- [Kuc-08] Martin Kucher: „Vom Keim zum Kristall – Über die Partikelbildung bei der Fällung schwer löslicher Feststoffe“, Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 2009, ISBN: 978-386644-331-0

- [Kur-96] Kurosch Thuro: „Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb, Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelbauprojekte“, Münchner Geologische Hefte Reihe B. Heft 1 Angewandte Geologie, München 1996
- [Law-75] Brien Lawn, Roodney Wilshaw: “Review Indentation fracture: principles and application”, Journal of Material Science 10, pp. 1049-1081, 1975
- [Mac-04] Fiona Mactaggart: „Identification and assessment of alternative disposal options for radioactive oilfield wastes“, Phase II Technical Report Project UKRSR07, Edinburgh 2004
- [Mal-06] Ronzon Mallick: „Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Exposition durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen – Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung“, Bayrisches Landesamt für Umwelt, Augsburg 2006
- [Mar-08] Gregor Markl: „Minerale und Gesteine Mineralogie – Petrologie – Geochemie“ 2. Auflage, Spektrum, Tübingen 2008, ISBN978-3-8274-1804-3
- [Mat-02] Sven Matthiesen: „Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktionen und Gestalt technischer System“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2002
- [Möl-03] Ingo Möller: „Nichtlineare Abhängigkeiten bei finanzwirtschaftlichen Zeitreihen, Aktuelle Testverfahren am Beispiel einer Wechselkursanalyse“, Wiesbaden 2003, ISBN 3-8244-7923-0
- [Nis-72] Y.Nishimatsu: „The mechanics of Rock Cutting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics“, Volume 9, pp. 261-270, 1972
- [Nöl-10] Markus Nöldgen: „Modellierung von ultrahochfestem Beton (UHPC) unter Impaktbelastung“, Kassel, 2010
- [Pop-10] Valentin L. Popov: „Kontaktmechanik und Reibung“, Springer, 2010, ISBN 978-3-642-13301-5
- [Qia-09] Qihu Qian, Chengzhi Qi, Mingyang Wang: “Dynamic strength of rocks and physical nature of rock strength”, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009
- [Ort-06] Sebastian Ortlepp: “Zur Beurteilung der Festigkeitssteigerung von hochfestem Beton unter hohen Dehngeschwindigkeiten“, Dissertation, Dresden, 2006
- [Ram-10] A. Ramezanzadeh, M. Hood: “A state of the art review of mechanical rock excavation technologies”, International Journal of Mining & Environmental Vol. No.1, 2010

- [Rei-04] Andreas Reichelt et. al.: „Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit NORM – Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände“ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, München, 2004
- [Ric-11] Hans Albert Richard, Manuela Sander: „Ermüdungsrisse Erkennen, sicher beurteilen, vermeiden“, 2. Auflage, Springer Vieweg, 2011, ISBN 978-3-8348-1594-1
- [Rin-64] John S. Rinehart: „Fracturing by Spalling“, Wear, Journal of Franklin Institute, Volume 7, pp.315-329, 1964
- [Rob-74] Willard Lincoln Roberts et.al.: „Encyclopedia of Minerals. Van Nostrand Reinhold Company“, New York 1974, ISBN 0-442-26820-3
- [Rox-73] Frank F. Roxbourough: „Cutting Rock with Picks“, The Mining Engineer, Volume 132, Heft 153, pp. 445-455, 1973
- [San-85] H P. Sanio Prediction of the Performance of Disc Cutters in Anisotropic Rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 22 No. 3, pp.153-161, 1985
- [Sch-09] Arne Schmidt: „Normalverteilung und Transformation bei Regressionen“, Beiträge zum Buch Methodik der empirischen Forschung, 3. Auflage, Wiesbaden 2009
- [Smi-92] K. P. Smith: „An Overview of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in the Petroleum Industry“, Environmental Assessment and Information Sciences Division, Argonne National Laboratory, Argonne/ Illinois 1992
- [Son-01] W. Sonderegger, P. Niemz: „Untersuchungen zur Bestimmung der Brinellhärte an MDF- und HDF- Platten mittels Wegmessung“, Professur Holzwissenschaften Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zentrum, Zürich 2001
- [Str-01] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung-StrlSchV), StrlSchV Ausfertigungsdatum: 20.07.2001
- [Stu-26] Herbert A. Sturges: „The Choice of a Class Interval“, Journal of the American Statistical Association, Vol. 21, No. 153, pp. 65-66, 1926
- [Tha-13] Sebastian Leonid Thau, „Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld“, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2013
- [Tom-03] Mason B. Tomson et. al.: „NORM scale formation, control, and relation to gas hydrate control“, Tenth international Petroleum Environmental Conference (IPEC), University Houston, Houston/ Texas 2003

- [Var-10] Per Varskog: „Identification, Handling and Disposal of NORM in the Norwegian Petroleum Industry“, <http://varskog.eu-norm.org/index.pdf>, Norway 2010
- [Wag-71] H. Wagner: „Der Mechanismus der Spanentstehung beim Zerspanen von Gesteinen“, *Rock Mechanics* 3, pp. 159-174, 1971
- [Wes-10] Engelbert Westkämper: „Einführung in die Fertigungstechnik“, Vieweg Teubner, Stuttgart 2010, p. 140, ISBN 978-3-8348-0835-6
- [Whi-73] B.N. Whittaker, A.B. „Szwilski: Rock cutting by Impact action, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*“, Volume 10, Issue 6, pp. 659–671, 1973
- [Wil-10] Holger Wilker: „Weibull-Statistik in der Praxis, Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Komponenten“, Band 3, pp.327-340, Waldshut-Tiengen, 2010, ISBN 978-3-8391-6241-5
- [Win-00] Scott J. Winters et.al.: “Feasibility of Re-Melting NORM-Contaminated Scrap Metal” University of Chicago, Argonne 2008
- [Zip-89] R. K. Zipf Jr., Z.T. „Bieniawski: A fundamental study of respirable dust generation in coal“, *Mining Science and Technology* Nr. 9, pp. 87-99, 1989
- [Züg-02] Sascha Zügler: „Untersuchungen zum elastisch-plastischen Verhalten von Kristalloberflächen mittels Kraft-Eindringtiefen-Verfahren“, Dissertation, Universität Würzburg, Würzburg 2002

Anhang

Anhang 1: Vorgehensweise zur Auswertung eines Schlagbildes

Anhang 2: Messung der Seitenkraft

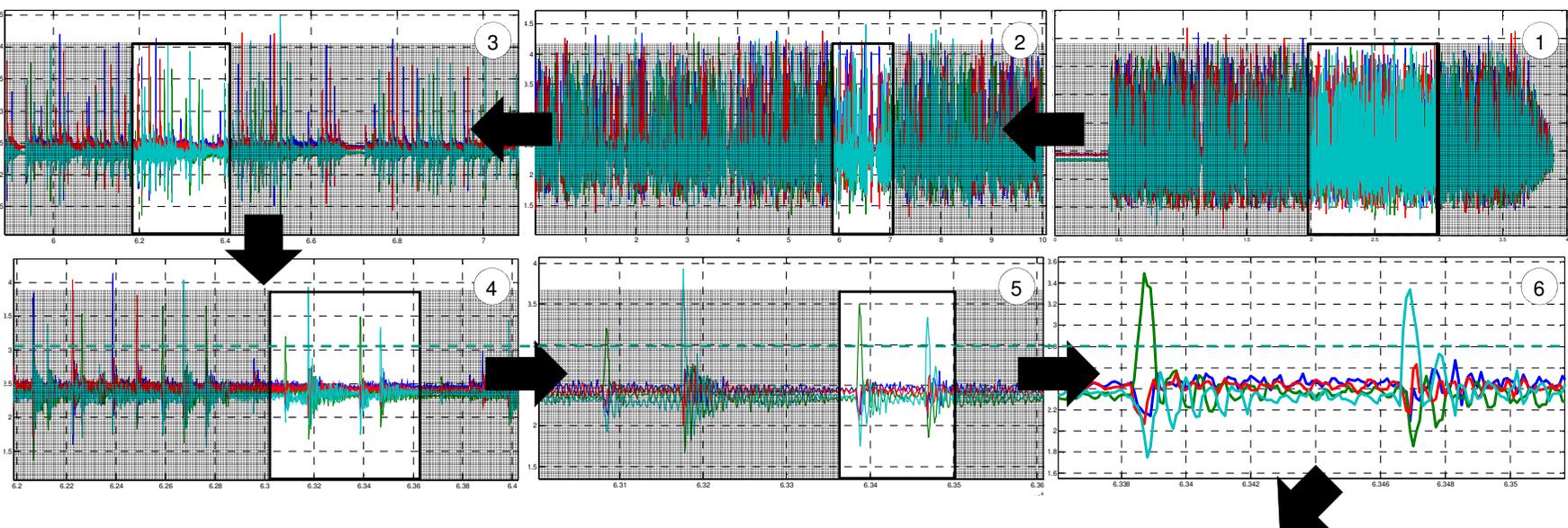
Anhang 3: Berechnung der Werkzeuggeschwindigkeit

Anhang 4: Erfassung der Schlagkraft beim schrägen Schlag

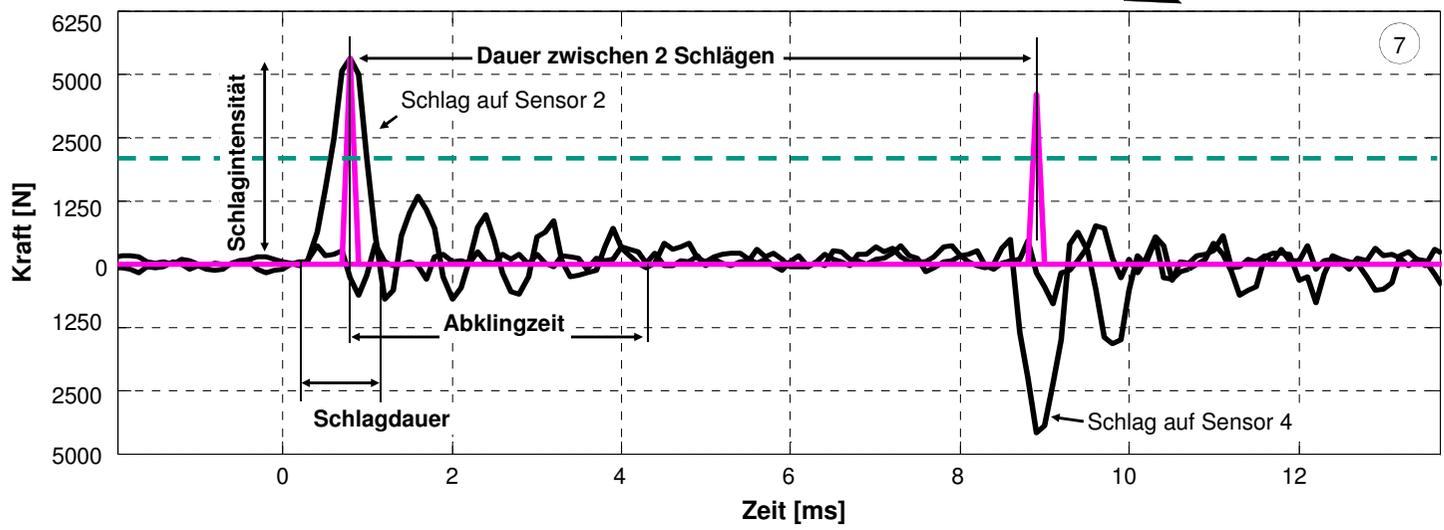
Anhang 5: Beanspruchung des Rohrs

Anhang 6: Ergebnisse Experimentelle Abtraguntersuchungen

Anhang 1 : Vorgehensweise zur Auswertung eines Schlagbildes



- Schlagintensität
- Schlagkraftverlauf
- - - Schwellwert
- Sensor 1
- Sensor 2
- Sensor 3
- Sensor 4



Anhang 2: Messung der Seitenkraft

Nachfolgend sind die Mittelwerte aus jeweils neun Schlagversuchen mit einer Schlagmasse $m_1 = 0,4 \text{ kg}$ $m_2 = 0,8 \text{ kg}$ zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen, dass eine proportionale Beziehung zwischen der maximalen Seitenkraft F_{XS} und der Schlagenergie, bei einer Vorspannkraft von $F_V = 3750 \text{ N}$, vorliegt. Die Berechnung des Reibanteils wurde nach dem coulombschen Gesetz ermittelt:

$$F_{XS} = \mu_0 \cdot F_V$$

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Schlagmasse $m_2 = 0,8 \text{ kg}$ die Seitenkraft annähernd doppelt so groß ist wie bei der Schlagmasse $m_1 = 0,4 \text{ kg}$. Das Verhältnis zwischen der maximalen Schlagkraft und der zum selben Zeitpunkt wirkenden Reibkraft ist mit 12,4 % in beiden Fällen gleich groß.

Schlagmasse: 0,4 kg			
Zeit [ms]	Mittelwert Schlagkraft [N]	Mittelwert Seitenkraft [N]	Summe
0	0	5	5
0,1	6	47	53
0,2	1038	128	1165
0,3	1658	182	1840
0,4	2148	133	2281
0,5	2017	48	2065
0,6	1607	-32	1575
0,7	628	-80	548
0,8	-450	-133	-583
0,9	-1222	-89	-1311
1	-1058	32	-1026
Vorspannkraft F_V [N]:			3750
Maximalwert Seitenkraft F_{XS} [N]:			182
Haftreibungskoeffizient [-]:			0,048
Schlagmaximum [N]:			2148
Seitenkraft [N]:			133
Verhältnis $(2 \cdot F_{XS} / F)$ [%]:			12,4

Schlagmasse: 0,8 kg		
Mittelwert Schlagkraft [N]	Mittelwert Seitenkraft [N]	Summe
1	3	4
7	5	12
1	26	26
229	109	338
2008	257	2265
3186	345	3531
4048	250	4298
3824	128	3952
3227	40	3267
2358	-49	2309
563	-180	383
Vorspannkraft F_V [N]:		3750
Maximalwert Seitenkraft F_{XS} [N]:		345
Haftreibungskoeffizient [-]:		0,092
Schlagmaximum [N]:		4048
Seitenkraft [N]:		250
Verhältnis $(2 \cdot F_{XS} / F)$ [%]:		12,4

Anhang 3: Berechnung der Werkzeuggeschwindigkeit

Die Berechnung der Werkzeugträgerbeschleunigung wird mithilfe der Bewegungsgleichung aus der Formel 4-3 und unter Berücksichtigung der Werkzeugmasse m_w durchgeführt.

$$\ddot{y} = k \cdot m \cdot e \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega t) \quad \text{mit } m = \frac{(m_u)}{(m_G + m_w + m_u)} \quad \text{Formel 4-3}$$

Entsprechend ergibt die Integration der Formel 4-3 die Geschwindigkeit des Werkzeugträgers mit dem angeflanschten Werkzeug:

$$\dot{y} = -k \cdot m \cdot e \cdot \Omega \cdot \cos(\Omega t) \quad \text{mit } m = \frac{(m_u)}{(m_G + m_w + m_u)}$$

mit den Parametergrößen:

\ddot{y}	[m/s ²]	Beschleunigung in y-Richtung
\dot{y}	[m/s]	Geschwindigkeit in y-Richtung
m	[kg]	Massenverhältnis
e	[m]	Exzentrizität der Unwucht
k	[-]	Korrekturfaktor
Ω	[s ⁻¹]	Erregerkreisfrequenz
t	[s]	Zeit

Das Massenverhältnis und die Exzentrizität der Unwucht sind aus den geometrischen Daten des Werkzeugs und des Werkzeugträgers bekannt.

Masse Werkzeugträger m_g	[kg]	1,638
Masse Unwucht m_u	[kg]	0,376
Masse Werkzeugträgergehäuse m_G	[kg]	1,262
Masse Werkzeug m_w	[kg]	0,56
Exzentrizität e	[m]	0,00334

Der Korrekturfaktor ist als das Verhältnis zwischen der Beschleunigung aus der Messung und der Berechnung definiert.

Messung \ddot{y} [m/s ²]	48	87	130	200	340	480	730	790	870	930
Berechnung \ddot{y} [m/s ²]	56	95	144	226	381	508	731	814	902	976
Korrekturfaktor k [-]	0,85	0,91	0,90	0,89	0,89	0,95	1,00	0,97	0,96	0,95

Der Mittelwert des Korrekturfaktors beträgt $k_f = 0,93$. Damit kann die Beschleunigung \ddot{y} und die Geschwindigkeit \dot{y} aus der oben aufgeführte Formel für unterschiedliche Frequenzen annäherungsweise berechnet werden.

Beschleunigung \ddot{y} [m/s ²]	52	88	134	209	354	471	678	755	837	905
Geschwindigkeit \dot{y} [m/s ²]	0,17	0,22	0,27	0,33	0,43	0,50	0,60	0,63	0,67	0,69

Anhang 4: Erfassung der Schlagkraft beim schrägen Schlag

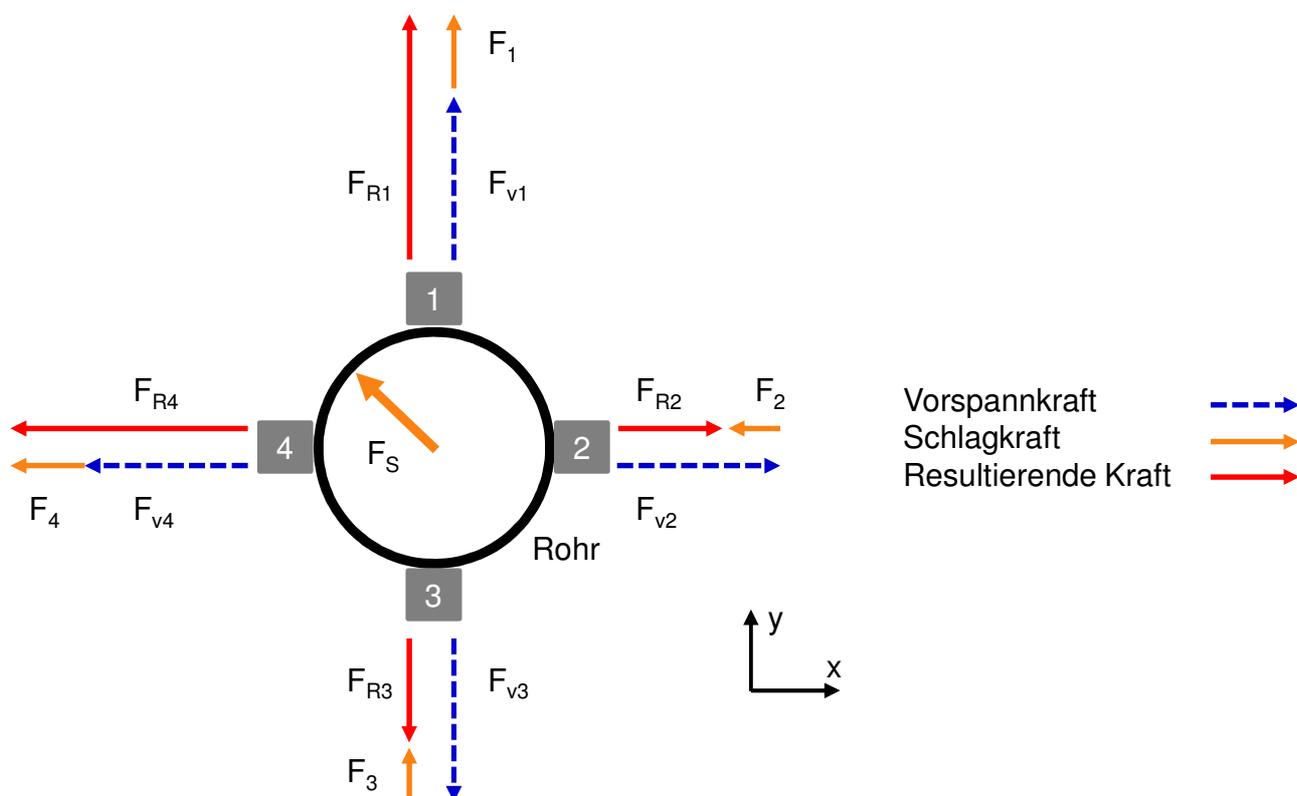


Abbildung 74: Darstellung der Kräfte bei einem Schlag zwischen zwei Sensoren

Die obige Darstellung zeigt schematisch die Messwerte der Sensoren bei einem schrägen Schlag an. Aus den Einzelkraftkomponenten wird mittels einer vektoriellen Addition die Schlagkraft berechnet.

$$F_S^2 = \left(\sum F_x\right)^2 + \left(\sum F_y\right)^2$$

$$F_S^2 = (F_{R4} - F_{R2})^2 + (F_{R1} - F_{R3})^2$$

Formel X-7-1

mit

F_{v1-4}	[N]	Vorspannkraft an den Sensor 1 bis 4
F_{R1-4}	[N]	Resultierende Kraft an den Sensor 1 bis 4
F_{1-4}	[N]	Anteil Schlagkraft an den Sensor 1 bis 4
F_S	[N]	Schlagkraft

Anhang 5: Beanspruchung des Rohrs

In den nachfolgenden Tabellen ist die Schlagzahl des Werkzeugs angegeben. Dabei handelt es sich um den Mittelwert der Schlagzahlen, die von vier Sensoren aufgezeichnet worden sind. In Verbindung mit der Schlagklasse ergeben diese Daten die Beanspruchung des Rohrs unter den angegebenen Randbedingungen.

Tabelle 26: Einfluss der Frequenz

Schlagklasse [%]	Frequenz [Hz]											
	65	95	118	135	150	160	170	180	185	190	195	200
6,25	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18,75	62	48	29	7	3	2	0	0	0	0	0	0
31,25	20	63	56	51	40	39	17	16	13	12	6	6
43,75	0	26	51	67	53	58	54	45	44	41	42	38
56,25		0	19	38	46	59	60	70	62	53	56	51
68,75			1	10	20	31	49	57	61	65	65	64
81,25				1	6	12	17	33	39	62	55	57
93,75					0	2	8	12	16	30	29	43
106,25						0	2	3	4	9	12	21
							0	0	0	0	5	8
								0	0	0	0	1
Gesamtschlagzahl	381	546	626	692	670	807	832	938	962	1087	1079	1149
Standardabweichung σ	20	29	36	43	48	51	58	61	64	67	69	72
Erwartungswert μ	7,3	8,7	11,8	12	13,7	14,8	16,2	16,3	17,3	18	18,3	19,1

Tabelle 27: Einfluss der Frequenz

Schlagklasse [%]	Frequenz [Hz]			Schlagklasse [%]	Frequenz [Hz]		
	203	206	210				
31,25	3	3	1	106,25	25	33	41
43,75	34	38	21	118,75	9	14	16
56,25	52	46	39	131,25	1	4	7
68,75	60	55	45				
81,25	60	62	56	Gesamtschlagzahl	1152	1221	1135
				Standardabweichung	74	75	77
				Erwartungswert	19,5	19,9	19,7

Tabelle 28: Einfluss der Beanspruchungszeit

Schlagklasse [%]	Frequenz 150 Hz					Frequenz 180 Hz				
	Beanspruchungszeit [s]									
	5	10	20	30	40	5	10	20	30	40
6,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18,75	4,5	6,8	14,3	15	18	0	0	0	0	0
31,25	26,5	45,5	97,3	138	187	14,5	29,8	43,5	57,5	80,5
43,75	26,5	50	104	161	221	27,8	56,3	104,5	153,3	206,5
56,25	20,5	46,8	91,3	137	184,3	25	55,8	116	182	240,5
68,75	8,5	13,8	32,5	53,3	70,3	21,3	37,3	81	131,3	175,8
81,25	0,5	1,5	3	6	8,3	9	22,3	44,3	73	95
93,75	0	0	0	0,5	0,5	3	5,3	14,3	19,8	25
106,25	0	0	0	0	0	0,3	0,5	1,5	3	4
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtschlagzahl	348	657	1369	2045	2757	403	830	1620	2479	3309
Standardabweichung σ	44,2	45,0	45,1	46,1	46,0	55,1	55,2	56,9	57,7	57,4
Erwartungswert μ	13,2	12,9	13,2	13,1	13,0	15,9	16,1	16,1	15,8	15,8

Tabelle 29: Einfluss der Beanspruchungszeit

Schlagklasse [%]	Frequenz 190 Hz				
	Beanspruchungszeit [s]				
	5	10	20	30	40
6,25	0	0	0	0	0
18,75	0	0	0	0	0
31,25	9,8	18,3	29	44,3	62,5
43,75	23,8	51,5	97,5	152,3	203,8
56,25	33,3	63,3	125,3	192,5	255,8
68,75	23,5	56	99,8	147,3	203,3
81,25	15	34,5	63,8	94,5	129
93,75	7,5	9	30,3	40,8	49,8
106,25	2,8	2,5	8	11,25	13,8
118,75	0,5	0	0,5	0,5	0,5
	0	0	0	0	0
Gesamtschlagzahl	464	940	1816	2733	3673
Standardabweichung σ	61,1	60,2	61,7	61,1	60,9
Erwartungswert μ	17,8	16,6	17,2	16,9	16,9

Tabelle 30: Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 150 Hz und Werkzeug (zwei Keile)

Schlagklasse [%]	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3		Mittelwert
	Keil 1	Keil 2	Keil 1	Keil 2	Keil 1	Keil 2	
6,25	0	0	0	0	0	0	0,0
18,75	10	18	9	21	10	9	12,8
31,25	64	99	71	83	74	98	81,5
43,75	115	92	90	86	85	97	94,2
56,25	73	54	51	38	75	42	55,5
68,75	17	12	14	11	16	9	13,2
81,25	1	1	1	1	1	2	1,2
93,75	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtschlagzahl	280	276	236	240	261	257	258,3
Standardabweichung σ	11,9	12,2	13,0	13,1	12,8	12,0	12,5
Erwartungswert μ	45,3	43,1	43,9	42,2	45,0	43,0	43,8

Tabelle 31: Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 180 Hz und Werkzeug (zwei Keile)

Schlagklasse [%]	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3		Mittelwert
	Keil 1	Keil 2	Keil 1	Keil 2	Keil 1	Keil 2	
6,25	0	0	0	0	0	0	0
18,75	0	0	0	0	0	0	0
31,25	46	58	47	41	45	42	46,5
43,75	92	107	82	84	93	99	92,8
56,25	106	96	122	112	106	99	106,8
68,75	62	45	60	54	57	50	54,7
81,25	23	22	17	18	20	26	21,0
93,75	6	7	4	7	5	4	5,5
106,25	2	2	1	1	0	0	1,0
Gesamtschlagzahl	337	337	333	317	326	320	328
Standardabweichung σ	16,24	16,28	14,87	15,18	15,32	15,43	15,6
Erwartungswert μ	57,18	55,87	57,77	58,00	56,46	56,46	57

Tabelle 32: Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 190 Hz und Werkzeug (zwei Keile)

Schlagklasse [%]	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3		Mittelwert
	Keil 1	Keil 2	Keil 1	Keil 2	Keil 1	Keil 2	
6,25	0	0	0	0	0	0	0
18,75	0	0	0	0	0	0	0
31,25	66	22	45	42	57	42	45,7
43,75	93	82	93	99	95	90	92,0
56,25	105	124	106	99	121	92	107,8
68,75	115	88	57	50	53	64	71,2
81,25	40	56	20	26	13	20	29,2
93,75	6	20	5	4	4	6	7,5
106,25	1	4	0	0	1	1	1,2
118,75	0	1	0	0	0	0	0,2
Gesamtschlagzahl	426	397	326	320	344	315	355
Standardabweichung σ	17,3	17,5	15,3	15,4	14,9	15,7	16
Erwartungswert μ	57,1	60,0	56,5	56,5	56,2	57,8	57

Tabelle 33: Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 150 Hz und Werkzeug (vier Keile)

Schlagklasse [%]	Keilnummer				Mittelwert
	K1	K2	K3	K4	
6,25	0	0	0	0	0
18,75	0	3	4	5	3
31,25	33	46	38	43	40
43,75	56	48	59	54	54,25
56,25	40	39	34	33	36,5
68,75	13	9	11	9	10,5
81,25	1	1	0	0	0,5
Gesamtschlagzahl	143	146	146	144	144,8
Standardabweichung σ	11,7	12,3	11,9	12,0	12,0
Erwartungswert μ	46,9	44,4	44,6	43,6	44,9

Tabelle 34: Einfluss Keilanzahl der Frequenz 180 Hz und Werkzeug (vier Keile)

Schlagklasse [%]	Keilnummer				Mittelwert
	K1	K2	K3	K4	
6,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0
18,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0
31,25	3,0	17,0	22,0	21,0	15,8
43,75	42,0	38,0	55,0	44,0	44,8
56,25	59,0	74,0	60,0	86,0	69,8
68,75	47,0	75,0	40,0	65,0	56,8
81,25	19,0	40,0	20,0	52,0	32,8
93,75	9,0	18,0	5,0	14,0	11,5
106,25	5,0	5,0	0,0	2,0	3,0
Gesamtschlagzahl	185	267	202	284	234,5
Standardabweichung σ	16,3	16,9	15,4	16,5	16,3
Erwartungswert μ	62,2	63,6	56	62,1	61

Tabelle 35: Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 190 Hz und Werkzeug (vier Keile)

Schlagklasse [%]	Keilnummer				Mittelwert
	K1	K2	K3	K4	
6,25	0	0	0	0	0
18,75	0	0	0	0	0
31,25	2	2	10	11	6,25
43,75	34	43	39	42	39,5
56,25	61	51	62	58	58
68,75	75	62	57	66	65
81,25	48	42	48	52	47,5
93,75	19	29	15	23	21,5
106,25	17	7	7	3	8,5
181,25	2	3	0	1	1,5
Gesamtschlagzahl	258	239	238	256	247,8
Standardabweichung σ	17,7	18,0	17,3	17,3	17,6
Erwartungswert μ	69,2	68,1	65,0	65,6	67,0

Tabelle 36: Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 150 Hz und Werkzeug (acht Keile)

Schlagklasse [%]	Keilnummer								Mittelwert
	K1	K2	K3	K4	K 5	K6	K7	K8	
6,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18,75	2	11	8	10	3	3	12	6	6,8
31,25	23	21	31	27	12	20	29	18	22,6
43,75	20	25	27	29	37	28	32	22	27,5
56,25	24	20	20	25	23	22	26	16	22
68,75	5	6	1	6	9	8	9	13	7,2
81,25	2	0	0	0	0	1	0	1	0,5
Gesamtschlagzahl	76	83	87	97	84	82	108	76	86,6
Standardabweichung σ	13,7	14,2	12,0	13,6	11,9	13,3	14,1	15,4	13,5
Erwartungswert μ	45,9	42,0	40,2	42,5	47,2	46,0	42,7	46,2	44,1

Tabelle 37: Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 180 Hz und Werkzeug (acht Keile)

Schlagklasse [%]	Keilnummer								Mittelwert
	K1	K2	K3	K4	K 5	K6	K7	K8	
6,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31,25	10	9	21	11	10	21	27	7	14,5
43,75	28	28	30	27	26	25	19	15	24,8
56,25	27	24	34	31	19	33	36	19	9
68,75	36	22	27	25	37	27	37	35	30,8
81,25	12	10	5	14	24	14	16	25	15
93,75	4	4	0	3	7	2	1	5	3,3
106,25	1	1	0	0	2	0	0	1	0,6
Gesamtschlagzahl	118	98	117	111	125	122	136	107	116,8
Standardabweichung σ	16,2	16,8	14,2	15,8	17,9	16,4	16,5	16,5	16,3
Erwartungswert μ	59,2	57,8	52,5	57,7	63,1	55,6	56,2	65,0	58,4

Tabelle 38: Einfluss Keilanzahl bei Frequenz 190 Hz und Werkzeug (acht Keile)

Schlagklasse [%]	Keilnummer								Mittelwert
	K1	K2	K3	K4	K 5	K6	K7	K8	
6,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31,25	12	7	16	19	12	13	20	10	13,6
43,75	27	28	32	25	16	24	23	14	23,6
56,25	24	26	29	34	26	29	22	21	26,4
68,75	35	32	25	30	27	32	35	29	30,6
81,25	29	19	15	29	42	29	41	29	29,1
93,75	11	5	1	12	17	5	11	9	8,9
106,25	3	1	0	1	8	0	3	4	2,5
118,75	0	1	0	0	4	0	0	0	0,6
Gesamtschlagzahl	141	119	118	150	152	132	155	116	135,4
Standardabweichung σ	18,8	17,1	15,8	18,9	20,9	17,1	19,7	18,9	18,4
Erwartungswert μ	64,0	61,7	55,6	61,7	70,4	61,5	64,2	66,6	63,2

Tabelle 39: Einfluss des Abstands

Schlagklasse [%]	Frequenz 150 Hz					Frequenz 190 Hz			
	Abstand [mm]					Abstand [mm]			
	1	2	3	4		1	2	3	4
6,25	0	0	0	0		0	0	0	0
18,75	2	26,5	0,5	4,5		0	0	0	0
31,25	19,5	106,3	39,5	47,8		1,3	29,25	7,3	10
43,75	257,3	88,3	63,8	51,5		4,5	91,25	38,3	36,5
56,25	488,5	34	52,8	3		48,3	100,5	53,5	47
68,75	162	8,8	24,3	12,3		243,8	79	68,5	37,3
81,25	3,3	0	6,5	1,5		329	32,5	50,8	28,3
93,75	0	0	0,8	0		201,3	11	24,5	16,3
106,25	0	0	0	0		63	2,5	8,3	6
118,75	0	0	0	0		8	0,5	1	0,8
131,25	0	0	0	0		0	0	0,3	0,3
143,75	0	0	0	0		0	0	0	0

Gesamtschlagzahl	3730	1055	752	611		3596	1386	1009	729
Standardabweichung σ	7,9	11,5	13,5	12,7		12,5	15,4	17,8	18,3
Erwartungswert μ	54	38,7	49,2	44,4		80,7	57,4	67,3	64,1

Anhang 6: Ergebnisse Experimentelle Abtraguntersuchungen

Die nachfolgende Tabelle 40 zeigt den Gesamtversuchsplan der experimentellen Untersuchungen. Bei jeder Versuchsreihe wurde zusätzlich der Einfluss der Frequenz in den Stufen 150 Hz, 180 Hz, 190 Hz und 210 Hz untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind jeweils sortiert nach dem betrachteten Einflussfaktor und sind in Tabelle 41 bis Tabelle 49 aufgeführt. Darin sind jeweils die Mittelwerte der Abtragleistung in Prozent aus jeweils drei Rohren der Länge 2 m angegeben. Die Angabe in der Klammer entspricht der Standardabweichung, dass anhand von drei Versuchen ermittelt worden ist. Da in der Regel keine 100 % Entfernung der Ablagerungen bei dem ersten Versuchen erreicht werden konnte, wurden mit den gleichen Parametern weitere Versuche an demselben Rohr durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Abtragleistung sind jeweils mit Buchstaben von a bis d nummeriert.

Tabelle 40: Gesamtversuchsplan der experimentellen Untersuchungen

Versuch	Härte [H _{BE}]	Dicke [mm]	Vorschub [mm/s]	Durchmesser [mm]	Drehung [-]
Versuchsreihe Nr. 1.1	76	1	10	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 1.2	76	1	30	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 1.3	76	1	50	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 2.1	76	2	10	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 2.2	76	2	30	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 3.1	143	1	10	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 3.1	143	1	30	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 4	225	1	10	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 5.1	143	2	10	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 5.2	143	2	30	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 6	143	2	10	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 7	76	3	10	53	Ein
Versuchsreihe Nr. 8	143	3	10	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 9	76	3	10	50	Ein
Versuchsreihe Nr. 10	76	3	10	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 11	76	3	10	58	Ein
Versuchsreihe Nr. 12.1	76	2	10	56	Ein
Versuchsreihe Nr. 12.1	76	2	10	56	Aus

Tabelle 41: Einfluss der Ablagerungsdicke

	F = 150 Hz	F = 180 Hz	F = 190 Hz	F = 210 Hz
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 1 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 1.1.a [%]	66 ($\sigma = 25$)	86 ($\sigma = 11$)	89 ($\sigma = 11$)	84 ($\sigma = 10$)
Versuch 1.1.b [%]	21 (13)	-	-	-
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 2 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 2.1.a [%]	37 ($\sigma = 7$)	69 ($\sigma = 4$)	74 ($\sigma = 19$)	76 ($\sigma = 2$)
Versuch 2.1.b [%]	18 ($\sigma = 2$)	21 ($\sigma = 10$)	21 ($\sigma = 0$)	18 ($\sigma = 2$)
Versuch 2.1.c [%]	12 ($\sigma = 5$)	-	-	-
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 3 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 10.a [%]	26 ($\sigma = 10$)	44 ($\sigma = 3$)	57 ($\sigma = 6$)	53 ($\sigma = 3$)
Versuch 10.b [%]	11 ($\sigma = 4$)	18 ($\sigma = 1$)	21 ($\sigma = 2$)	20 ($\sigma = 5$)
Versuch 10.c [%]	-	11 ($\sigma = 1$)	-	-

Tabelle 42: Einfluss des Vorschubs

	F = 150 Hz	F = 180 Hz	F = 190 Hz	F = 210 Hz
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 1 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 1.1.a [%]	66 ($\sigma = 25$)	86 ($\sigma = 11$)	89 ($\sigma = 11$)	84 ($\sigma = 10$)
Versuch 1.1.b [%]	21 (13)	-	-	-
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 1 mm, Vorschub: 30 mm/s				
Versuch 1.2.a [%]	18 ($\sigma = 12$)	62 ($\sigma = 19$)	69 ($\sigma = 17$)	76 ($\sigma = 13$)
Versuch 1.2.b [%]	22 ($\sigma = 10$)	21 ($\sigma = 6$)	20 ($\sigma = 5$)	16 ($\sigma = 6$)
Versuch 1.2.c [%]	16 ($\sigma = 2$)	6 ($\sigma = 3$)	8 ($\sigma = 8$)	-
Versuch 1.2.d [%]	13 ($\sigma = 8$)	-	2 ($\sigma = 3$)	-
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 1 mm, Vorschub: 50 mm/s				
Versuch 1.3.a [%]	23 ($\sigma = 11$)	18 ($\sigma = 6$)	30 ($\sigma = 6$)	49 ($\sigma = 5$)
Versuch 1.3.b [%]	15 ($\sigma = 4$)	14 ($\sigma = 7$)	20 ($\sigma = 7$)	19 ($\sigma = 1$)
Versuch 1.3.c [%]	11 ($\sigma = 1$)	12 ($\sigma = 3$)	11 ($\sigma = 3$)	10 ($\sigma = 3$)
Versuch 1.3.d [%]	9 ($\sigma = 2$)	12 ($\sigma = 3$)	10 ($\sigma = 3$)	5 ($\sigma = 1$)

Tabelle 43: Einfluss des Vorschubs

	F = 150 Hz	F = 180 Hz	F = 190 Hz	F = 210 Hz
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 2 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 2.1.a [%]	37 ($\sigma = 7$)	69 ($\sigma = 4$)	74 ($\sigma = 19$)	76 ($\sigma = 2$)
Versuch 2.1.b [%]	18 ($\sigma = 2$)	21 ($\sigma = 10$)	21 ($\sigma = 0$)	18 ($\sigma = 2$)
Versuch 2.1.c [%]	12 ($\sigma = 5$)	-	-	-
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 2 mm, Vorschub: 30 mm/s				
Versuch 2.2.a [%]	26 ($\sigma = 1$)	31 ($\sigma = 3$)	53 ($\sigma = 10$)	57 ($\sigma = 5$)
Versuch 2.2.b [%]	19 ($\sigma = 8$)	20 ($\sigma = 3$)	20 ($\sigma = 8$)	30 ($\sigma = 5$)
Versuch 2.2.c [%]	15 ($\sigma = 5$)	19 ($\sigma = 6$)	12 ($\sigma = 2$)	-
Versuch 2.2.d [%]	10 ($\sigma = 5$)	7 ($\sigma = 2$)	2 ($\sigma = 3$)	

Tabelle 44: Einfluss des Vorschubs

	F = 150 Hz	F = 180 Hz	F = 190 Hz	F = 210 Hz
Härte: 143 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 2 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 5.1.a [%]	83 ($\sigma = 19$)	99 ($\sigma = 0$)	93 ($\sigma = 4$)	99 ($\sigma = 0$)
Versuch 5.1.b [%]	17 ($\sigma = 19$)	21 ($\sigma = 10$)	6 ($\sigma = 3$)	-
Härte: 143 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 2 mm, Vorschub: 30 mm/s				
Versuch 5.2.a [%]	22 ($\sigma = 5$)	68 ($\sigma = 10$)	78 ($\sigma = 21$)	95 ($\sigma = 10$)
Versuch 5.2.b [%]	33 ($\sigma = 8$)	21 ($\sigma = 2$)	19 ($\sigma = 16$)	5 ($\sigma = 9$)
Versuch 5.2.c [%]	23 ($\sigma = 7$)	6 ($\sigma = 7$)	-	-
Versuch 5.2.d [%]	6 ($\sigma = 5$)		-	

Tabelle 45: Einfluss der Härte

	F = 150 Hz	F = 180 Hz	F = 190 Hz	F = 210 Hz
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 1 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 1.1.a [%]	66 ($\sigma = 25$)	86 ($\sigma = 11$)	89 ($\sigma = 11$)	84 ($\sigma = 10$)
Versuch 1.1.b [%]	21 (13)	-	-	-
Härte: 143 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 1 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 3.1.a [%]	66 ($\sigma = 21$)	97 ($\sigma = 2$)	98 ($\sigma = 1$)	98 ($\sigma = 1$)
Versuch 3.1.b [%]	24 ($\sigma = 11$)	-	-	-
Härte: 225 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 1 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 4 [%]	93 ($\sigma = 2$)	92 ($\sigma = 5$)	95 ($\sigma = 7$)	100 ($\sigma = 0$)

Tabelle 46: Einfluss der Härte

	F = 150 Hz	F = 180 Hz	F = 190 Hz	F = 210 Hz
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 2 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 2.1.a [%]	37 ($\sigma = 7$)	69 ($\sigma = 4$)	74 ($\sigma = 19$)	76 ($\sigma = 2$)
Versuch 2.1.b [%]	18 ($\sigma = 2$)	21 ($\sigma = 10$)	21 ($\sigma = 0$)	18 ($\sigma = 2$)
Versuch 2.1.c [%]	12 ($\sigma = 5$)	-	-	-
Härte: 143 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 2 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 5.1.a [%]	83 ($\sigma = 19$)	99 ($\sigma = 0$)	93 ($\sigma = 4$)	99 ($\sigma = 0$)
Versuch 5.1.b [%]	17 ($\sigma = 19$)	21 ($\sigma = 10$)	6 ($\sigma = 3$)	-

Tabelle 47: Einfluss der Härte

	F = 150 Hz	F = 180 Hz	F = 190 Hz	F = 210 Hz
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 3 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 10.a [%]	26 ($\sigma = 10$)	44 ($\sigma = 3$)	57 ($\sigma = 6$)	53 ($\sigma = 3$)
Versuch 10.b [%]	11 ($\sigma = 4$)	18 ($\sigma = 1$)	21 ($\sigma = 2$)	20 ($\sigma = 5$)
Versuch 10.c [%]	-	11 ($\sigma = 1$)	-	-
Härte: 143 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 3 mm, Vorschub: 10 mm/s				
Versuch 8.a [%]	41 ($\sigma = 18$)	83 ($\sigma = 10$)	95 ($\sigma = 4$)	99 ($\sigma = 0$)
Versuch 8.b [%]	32 ($\sigma = 13$)	11 ($\sigma = 3$)	-	-

Tabelle 48: Einfluss des Abstands

	F = 150 Hz	F = 180 Hz	F = 190 Hz	F = 210 Hz
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 3 mm, Vorschub: 10 mm/s, WZ: 50				
Versuch 9.a [%]	-	21 ($\sigma = 8$)	25 ($\sigma = 9$)	28 ($\sigma = 4$)
Versuch 9.b [%]	-	21 ($\sigma = 8$)	17 ($\sigma = 6$)	16 ($\sigma = 3$)
Versuch 9.c [%]	-	9 ($\sigma = 5$)	13 ($\sigma = 1$)	-
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 3 mm, Vorschub: 10 mm/s, WZ: 53				
Versuch 7.a [%]	-	28 ($\sigma = 7$)	36 ($\sigma = 9$)	46 ($\sigma = 10$)
Versuch 7.b [%]	-	21 ($\sigma = 3$)	23 ($\sigma = 3$)	16 ($\sigma = 10$)
Versuch 7.c [%]	-	11 ($\sigma = 1$)	16 ($\sigma = 2$)	-
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 3 mm, Vorschub: 10 mm/s, WZ: 56				
Versuch 10.a [%]	26 ($\sigma = 10$)	44 ($\sigma = 3$)	57 ($\sigma = 6$)	53 ($\sigma = 3$)
Versuch 10.b [%]	11 ($\sigma = 4$)	18 ($\sigma = 1$)	21 ($\sigma = 2$)	20 ($\sigma = 5$)
Versuch 10.c [%]	-	11 ($\sigma = 1$)	-	-

Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 3 mm, Vorschub: 5 mm/s, WZ: 58				
Versuch 11.1 [%]	-	-	83 ($\sigma = 3$)	-
Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 3 mm, Vorschub: 10 mm/s, WZ: 58				
Versuch 11.2 [%]	-	-	-	85 ($\sigma = 6$)

Tabelle 49: Einfluss der Drehung

Härte: 76 H_{BE}, Ablagerungsdicke: 2 mm, Vorschub:10 mm/s, WZ: 56				
Frequenz	200 Hz	200 Hz	200 Hz	200 Hz
Drehung	Ein	Ein	Aus	Aus
Versuch 12.1 [%]	40 ($\sigma = 2$)	40 ($\sigma = 5$)	-	-
Versuch 12.1 [%]	-	-	32 ($\sigma = 4$)	32 ($\sigma = 5$)