

Untersuchungen zur Betriebsparameterwahl für ein neuartiges Rohrintrennsystem

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Bau-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Madeleine Bachmann, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 07.11.2024

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.sc.agr. Kurt Heppler

Kurzfassung

Durch den Beschluss der deutschen Bundesregierung, nach dem Reaktorunfall von Fukushima im März 2011 aus der Nutzung der Kernenergie auszusteigen, befinden sich in Deutschland aktuell 27 Prototyp- und Leistungsreaktoren im Rückbau. Seit April 2023 sind in der Bundesrepublik keine Kernkraftwerke mehr im Betrieb. [1]

Der Rückbau von Rohrleitungen, die aufgrund von beengten Platzverhältnissen oder durch die Einbaulage in Betonstrukturen von außen nur schwer zugänglich sind, ist mit vielen Herausforderungen und Mehraufwand für das Personal vor Ort verbunden. Es existiert u.a. kein universelles Rohrtrennsystem, mit welchem Rohrleitungen aus verschiedenen Materialien, Durchmessern und Wandstärken von der Rohrinneenseite getrennt werden können. Für die Anwendung im kerntechnischen Umfeld sind zusätzliche Funktionen wie eine fernhantierte Bedienung oder die Dekontaminierbarkeit der Maschine von großer Bedeutung. Auf dem Markt verfügbare Geräte sind größtenteils auf die Rohraußentrennung fokussiert und auf gewisse Durchmesser und Materialien beschränkt. Zudem basieren die Entwicklungen auf konventionellen Anwendungsfällen und müssen für die Rahmenbedingungen in einer kerntechnischen Anlage weiter adaptiert werden.

Ausgehend davon wird in dieser Arbeit die Rohrinrentrennung durch Scheibenfräser, Kreissägeblätter und Trennscheiben an unterschiedlichen Werkstücken untersucht. Anschließend werden für die drei genannten Fertigungsverfahren Empfehlungen für die Betriebsparameterwahl zur Rohrinrentrennung ausgesprochen. Die Entwicklung eines Versuchsstandes zur Rohrinrentrennung und die Auswahl der Messtechnik einschließlich der Methodik der definierten Zielgrößen bilden einen weiteren Schwerpunkt dieser Arbeit.

Die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Dissertation sind Teil des vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojektes „Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrinrentrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen (RoTre).“ Im genannten Projekt mit Förderkennzeichen 15S9415A+B wurde ausgehend von verschiedenen experimentellen Versuchsreihen ein Prototyp zur Rohrinrentrennung entwickelt. Der Nachweis der Praxistauglichkeit des entwickelten Rohrinrentrennsystems bildet den Abschluss der Arbeit.

Abstract

Following the German government's decision to phase out the use of nuclear energy after the reactor accident in Fukushima in March 2011, 27 prototype and power reactors are currently undergoing a dismantling process in Germany. No nuclear power plants have been in operation in Germany since April 2023. [1]

The dismantling of pipelines, which are difficult to access from the outside due to limited space or because they are installed in concrete structures, is associated with many challenges and additional work for the personnel on site. Among other things, there is no universal pipe cutting system that can be used to separate pipes made of different materials, diameters and wall thicknesses from the inside of the pipe. Additional functions such as remote operation or the ability to decontaminate the machines, are of great importance for use in a nuclear environment. Most of the devices available on the market focus on pipe decontamination and are limited to certain diameters and materials. In addition, the developments are based on conventional applications and must be further adapted to the particular conditions in a nuclear facility.

Based on this, this thesis examines the internal pipe separation using disk cutters, circular saw blades and cut-off wheels on different work pieces. Subsequently, recommendations for the choice of operating parameters for internal pipe cutting are made for the three production processes mentioned. This thesis also focuses on the development of a test rig for internal pipe cutting and the selection of a measurement technique, including the methodology of the defined targets.

The investigations presented in this dissertation are part of the research project "Development of a novel universally internal pipe separator for the dismantling of (contaminated) pipelines (RoTre)", funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). The aforementioned project, which has the funding reference 15S9415A+B, developed a prototype for internal pipe separation based on various experimental test series. Proof of the practical suitability of the developed internal pipe separation system thereby concludes the doctoral thesis.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
Einheiten- und Symbolverzeichnis	xix
Vorwort	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Motivation und Zielsetzung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Demontage von Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen	5
2.1 Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland	5
2.2 Rückbau eines Kernkraftwerkes	6
2.2.1 Freigabeverfahren.....	8
2.2.2 Demontage- und Zerlegetechniken.....	9
2.2.3 Endlagerung radioaktiver Abfälle	10
2.3 Rohrleitungen in Kernkraftwerken	11
2.3.1 Rückbaumassen und Praxisbeispiele Rohrleitungen	12
2.3.2 Reaktortypen in Deutschland - Leichtwasserreaktoren	14
2.3.2.1 Funktion eines DWRs	14
2.3.2.2 Funktion eines SWRs.....	15
2.3.3 Alterungsbedingte Schadensfälle an Rohrleitungen.....	16
2.3.4 Ausführungen von Rohrleitungen in Kernkraftwerken	17
3 Stand der Technik Rohrtrennung	23
3.1 Einführung und Abgrenzung Fertigungsverfahren	23
3.2 Rohraußentrennung.....	25
3.2.1 Hand- und kettengeführte Rohrsägen	25
3.2.2 Orbitale Rohrsägen.....	27
3.2.3 Winkelschleifer.....	27
3.3 Rohrintrennung	28
3.3.1 Rohrfräser Orano GmbH	29
3.3.2 Prototyp Kübler Rohrtrenntechnik GmbH	30
3.4 Schlussfolgerungen Stand der Technik.....	30
3.5 Offene Fragestellungen und wissenschaftliches Programm	31

4 Experimentelle Versuchsreihen	33
4.1 Systembeschreibung	33
4.2 Trennwerkzeuge	36
4.2.1 Scheibenfräser und Kreissägeblätter	36
4.2.1.1 Scheibenfräser und Kreissägeblätter für experimentelle Versuchsreihen	39
4.2.2 Trennscheiben	41
4.2.2.1 Trennscheiben für experimentelle Versuchsreihen	45
4.3 Werkstücke	47
4.3.1 Freiliegende Werkstücke	48
4.3.2 Einbetoniertes Werkstück.....	51
4.4 Funktion Versuchsstand.....	53
4.4.1 Aufbau Versuchsstand.....	53
4.4.2 Anordnung von Werkstück, Werkzeug und Maschine.....	55
4.4.2.1 Vorschubgeschwindigkeit V_f	56
4.4.2.2 Umfangsgeschwindigkeit V_c	57
4.4.2.3 Drehung Werkstück	60
4.5 Messtechnik und Methodik zur Zielgrößenbestimmung	60
4.5.1 Methodik Schnittkraft.....	61
4.5.2 Methodik Volumenabtrag.....	63
4.5.3 Methodik Massenverlust und Wärmeentwicklung	67
4.5.4 Methodik Staubkonzentration	68
4.6 Versuchsplanung und -durchführung.....	70
5 Ergebnisse und Auswertung experimentelle Versuchsreihen	73
5.1 Versuchsreihen mit Trennscheiben.....	74
5.1.1 Vorversuche Trennscheiben	75
5.1.2 Hauptversuche Trennscheiben.....	75
5.1.3 Ergebnisse und Auswertung Schnittkraft und Volumenabtrag	77
5.1.4 Ergebnisse und Auswertung Massenverlust und Wärmeentwicklung.....	91
5.1.5 Ergebnisse und Auswertung Staubkonzentration	98
5.1.6 Zusammenfassender Vergleich Trennscheiben und Betriebsparameterwahl	102
5.2 Versuchsreihen mit Scheibenfräser und Kreissägeblättern.....	108
5.2.1 Vorversuche Kreissägeblatt (KSB1, HSS)	108
5.2.2 Hauptversuche Scheibenfräser und Kreissägeblätter	110
5.2.3 Ergebnisse und Auswertung Schnittkraft, Volumenabtrag und Wärmeentwicklung.....	111
5.2.4 Zusammenfassender Vergleich Scheibenfräser/Kreissägeblätter und Betriebsparameterwahl	123
5.2.5 Validierungsversuche mit Prototyp	125
5.2.5.1 Funktionsbeschreibung Prototyp zur Rohrintrennung.....	125
5.2.5.2 Durchführung Validationsversuche mit Prototyp	127
5.2.5.3 Vergleich Prototyp mit Stand der Technik.....	129
6 Zusammenfassung	131
Literaturverzeichnis	133

Anhang	147
A: Versuchsreihen Trennscheiben	149
B: Versuchsreihen Scheibenfräser und Kreissägeblätter	157
C: Detailinformationen Prototyp.....	164

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Ablaufdiagramm Forschungsprozess, nach [9, S. 3].....	3
Abbildung 2.1: Ablauf Rückbau eines Kernkraftwerkes, nach [19]	7
Abbildung 2.2: Ablauf Freigabeverfahren, nach [20, S. 2].....	8
Abbildung 2.3: v.l.n.r.: Dekontamination von Rohrleitungen mittels Dampf- Hochdruck [21]; Gitterboxen mit Rohrleitungen [22]; Freimessanlage [23, S. 9]; Entscheidungsmessung von Rohrleitungen in einer Freimessanlage [24]	9
Abbildung 2.4: Übersicht mechanische und thermische Zerlegetechniken, nach [25, S. 22].....	10
Abbildung 2.5: Rückbaumassen eines Kernkraftwerkes am Beispiel der Anlage KMK, nach [5, S. 6]	12
Abbildung 2.6: Rohrleitungen im Maschinenhaus des GKN I [35].....	13
Abbildung 2.7: Einbetonierte Rohrleitungen im KMK; links/mittig: Rohrleitungen in Bodenplatte; rechts: Rohrleitungen in einer Wand	13
Abbildung 2.8: Schematische Darstellung eines DWRs [37]	14
Abbildung 2.9: Schematische Darstellung eines SWRs [38].....	15
Abbildung 2.10: Alterungsbedingte Schadenshäufigkeit verschiedener Komponenten (DWR und SWR), nach [8, S. 266].....	16
Abbildung 2.11: Kenngrößen zur Beschreibung einer Rohrleitung, nach [43], [44]	18
Abbildung 2.12: Fretz-Moon-Schweißwalzwerk von unten gesehen, nach [52, S. 36].....	21
Abbildung 2.13: Schrägwalz-Pilgerschrittverfahren [53]	22
Abbildung 3.1: Übersicht Einteilung der Hauptgruppe 3 „Trennen“ [56, S. 8].....	24
Abbildung 3.2: Untergliederung auf dem Markt verfügbare Geräte zur Rohraußentrennung	25
Abbildung 3.3: v.l.n.r.: Rohrtrennmaschine „Exact Inox 220“ [61], Rohraußentrennung Edelstahlrohr [61], Rohrtrennmaschine „Exact Pro Series 360“ [63], Rohraußentrennung Stahlrohrpfahl [62].....	26
Abbildung 3.4: Kettengeführte Rohrtrennmaschine „Exact Infinity“ [64]	26
Abbildung 3.5: Orbitale Rohrsäge „CC172“ [65].....	27
Abbildung 3.6: links: Rohraußentrennung mit Winkelschleifer [69]; rechts: Anwendung Winkelschleifer im KGR [70, S. 51]	28
Abbildung 3.7: Untergliederung Rohrrinntrennsysteme	28
Abbildung 3.8: links: Prototyp Orano GmbH [71]; rechts: Schnitt durch einen RDB, nach [72, S. 20]	29
Abbildung 3.9: Rohrrinntrennung einer schwer zugänglichen Rohrleitung in einem Stollen mittels Prototyp Kübler Rohrtrenntechnik GmbH [74].....	30

Abbildung 4.1: Parameterdiagramm, nach [9, S. 36], [75, S. 3, 148].....	33
Abbildung 4.2: links: Scheibenfräser kreuzverzahnt; rechts: Scheibenfräser geradeverzahnt, nach [77, S. 1]	37
Abbildung 4.3: Schematische Einteilung von Schneidstoffen nach ausgewählten Kriterien, nach [82, S. 114].....	38
Abbildung 4.4: Knoop Härte (HK) von Schleif- und Werkstoffen [83, S. 264].....	42
Abbildung 4.5: Aufbau einer Trennscheibe mit konventionellen Schleifmitteln, nach [101, S. 2].....	44
Abbildung 4.6: Aufbau Trennscheibe mit Schleifmittel Diamant, nach [102, S. 276- 277], [103, S. 1].....	44
Abbildung 4.7: Bauformen von Trennscheiben [99]	47
Abbildung 4.8: Vorderansicht freiliegende Werkstücke für experimentelle Versuchsreihen; v.l.n.r.: Werkstücknummer 1 - 4.....	49
Abbildung 4.9: Draufsicht und Großaufnahme Längsschweißnaht Werkstück 1	49
Abbildung 4.10: Bezeichnung hochlegierter Stähle am Beispiel des Kurznamen X6CrNiTi18-10, nach [111].....	51
Abbildung 4.11: Bezeichnung warmfester Stähle am Beispiel des Kurznamen P235GH, nach [114, S. 1]	51
Abbildung 4.12: Einbetoniertes Werkstück für experimentelle Versuchsreihen	52
Abbildung 4.13: Seitenansicht Versuchsstand zur Rohrintrennung	53
Abbildung 4.14: Detailaufnahmen Versuchsstand - Werkstückaufnahme und Antrieb Werkstücke.....	54
Abbildung 4.15: Detailaufnahmen Versuchsstand - Werkzeugschlitten und Übersetzung Vorschubgeschwindigkeit am Beispiel des Antriebsmotors für Scheibenfräser und Kreissägeblätter	54
Abbildung 4.16: Schematische Darstellung der Maschinenparameter an Werkstück und Werkzeug	55
Abbildung 4.17: Detailaufnahmen Versuchsstand - Handsteuerung	56
Abbildung 4.18: Verlauf Vorschubgeschwindigkeit.....	57
Abbildung 4.19: links: Zuordnung Schalterstellung MOVIMOT Stirnradgetriebemotor zur Abtriebsdrehzahl; rechts: Laser-Fototachometer Modell RPM10 [122]	58
Abbildung 4.20: links: Antrieb Trennscheiben mittels Geradschleifer; rechts: Detailansicht Geradschleifer [123].....	59
Abbildung 4.21: Detailaufnahmen Versuchsstand - Rohrintrennung mittels Trennscheiben	60
Abbildung 4.22: Datenübertragung 6-Achsen-Kraft-Momentensensor (Typ K6D110), nach [125].....	61

Abbildung 4.23: links: Schematische Darstellung der Position des Kraft- Momentensensors; mittig: Detailaufnahme Sensor unter MOVIOT- Stirnradgetriebemotor; rechts: Kraftmessdose K6D110 [125].....	62
Abbildung 4.24: Beispiel Datenaufnahme V19, TS2 (A) an Werkstück 1	62
Abbildung 4.25: links: Messung mittels Laser-Profil-Scanner am Versuchsstand; rechts: Laser-Profil-Scanner Modell 2910-25 [126, S. 1].....	63
Abbildung 4.26: Eingrenzung der Fläche für V44 in Software „scanCONTROL Configuration Tools“.....	64
Abbildung 4.27: Anwendung der Rechteckregel auf einen Laser-Profil-Scan, nach Metzger [127, S. 34].....	64
Abbildung 4.28: Darstellung V43 und V44 über die Anzahl der Profile.....	65
Abbildung 4.29: links: Schematische Darstellung der Position des Wegsensors; rechts: Detailaufnahme Wegsensor.....	66
Abbildung 4.30: Schematische Darstellung des zu messenden, definierten Weges durch Wegsensor	66
Abbildung 4.31: links: Präzisionswaage, Modell Excellence XS603S [132]; rechts: Wärmebildkamera, Modell testo 872s [131, S. 1].....	67
Abbildung 4.32: links: CEL-712 Microdust Pro Echtzeit-Staubmonitor [135, S. 8]; rechts: Probenahmesonde, nach [135, S. 9].....	68
Abbildung 4.33: links: Anbringung Probenahmesonde am Versuchsstand; rechts: TUFF-Luftprobenahmepumpe, nach [136, S. 2].....	69
Abbildung 4.34: Staubkonzentration TS1 (CER) – V24 an Werkstück 1.....	70
Abbildung 4.35: Ursachen für Messabweichungen durch den Messvorgang [82, S. 13]	72
Abbildung 5.1: Kenngrößen eines Box-Whisker-Plots [137, S. 132].....	74
Abbildung 5.2: links: Schnittkraft F_x (Mittelwert); rechts: Schnittkraft F_x (Max.) für TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) jeweils an Werkstück 1 und Werkstück 2.....	77
Abbildung 5.3: Schnittkraftentwicklung für TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit an Werkstück 1	78
Abbildung 5.4: Vergleich Schnittkraft und Volumenabtrag von TS1 (CER) an Werkstück 1.....	78
Abbildung 5.5: Vergleich Schnittkraft und Volumenabtrag von TS1 (CER) an Werkstück 2.....	79
Abbildung 5.6: Lineare Regression Vorschubgeschwindigkeit und Volumenabtrag für TS1 (CER) an Werkstück 2.....	82
Abbildung 5.7: Lineare Regression Vorschubgeschwindigkeit und Schnittkraft F_x (Max.) für TS1 (CER) an Werkstück 2	83
Abbildung 5.8: Vergleich Volumenabtrag TS1 (CER) und TS2 (A) an Werkstück 2.....	84
Abbildung 5.9: Vergleich Volumenabtrag und Schnittkraft TS2 (A) an Werkstück 2	84
Abbildung 5.10: Vergleich Volumenabtrag und Schnittkraft TS3 (D) an Werkstück 2	86

Abbildung 5.11: Vergleich des Volumenabtrags TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) jeweils an Werkstück 1 und Werkstück 2	86
Abbildung 5.12: links: Anbringung Werkstück 5 am Versuchsstand; rechts: Versuchsdurchführung V52	88
Abbildung 5.13: 3D-Darstellung Volumenabtrag TS1 (CER) - V51 und TS3 (D) - V52 in der Software „scanCONTROL 3D-View“	88
Abbildung 5.14: Vergleich Schnittbreite und Schnitttiefe TS3 (D) - V51 und TS1 (CER) - V52	89
Abbildung 5.15: Vergleich Massenverlust TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 1 und 2.....	91
Abbildung 5.16: Selbstschärfung Keramikkorn über die Schleifzeit [98, S. 23].....	92
Abbildung 5.17: Vergleich Massenverlust, maximale Temperatur und Volumenabtrag TS1 (CER) an Werkstück 2.....	93
Abbildung 5.18: Lineare Regression Vorschubgeschwindigkeit und Massenverlust für TS1 (CER) an Werkstück 2.....	94
Abbildung 5.19: Vergleich der Zielgrößen Massenverlust, maximale Temperatur und Volumenabtrag TS2 (A) an Werkstück 2.....	94
Abbildung 5.20: Vergleich der Zielgrößen Massenverlust, maximale Temperatur und Volumenabtrag TS3 (D) an Werkstück 2.....	95
Abbildung 5.21: Wärmeentwicklung von TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 2.....	95
Abbildung 5.22: Wärmebild mit Hotspot bei V_{f4} - links: TS1 (CER) - Versuch 42; rechts: TS2 (A) - Versuch 40, Werkstück 2	96
Abbildung 5.23: Wärmebild mit Hotspot bei V_{f4} - TS3 (D) - Versuch 37, Werkstück 2.....	97
Abbildung 5.24: Vergleich Staubkonzentration TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 1.....	100
Abbildung 5.25: Vergleich der maximalen Staubkonzentration TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 1.....	100
Abbildung 5.26: Vergleich Massenverlust und Staubkonzentration von TS2 (A) an Werkstück 1.....	101
Abbildung 5.27: Gegenüberstellung Ergebnisse Zielgrößen in Form von Box-Whisker- Plots für Trennscheiben am Beispiel von Versuchsreihe 2	103
Abbildung 5.28: Schnittkraftentwicklung für KSB1 (HSS) in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl an Werkstück 1.....	109
Abbildung 5.29: Vergleich maximale Temperatur von SF1 (HSS) und KSB1 (HSS) an Werkstück 2 bei V_{f4}	112
Abbildung 5.30: Wärmebild mit Hotspot bei V_{f4} und Drehzahl 150 min^{-1} - links: SF1 (HSS) - Versuch 81; rechts: KSB1 (HSS) - Versuch 84	112
Abbildung 5.31: Schnittkraftentwicklung für KSB1 (HSS) und SF1 (HSS) an Werkstück 2 bei V_{f4}	114

Abbildung 5.32: Vergleich maximale Temperatur, Volumenabtrag und Schnittkraft KSB1 (HSS) an Werkstück 2 bei V_{f4}	115
Abbildung 5.33: Vergleich maximale Temperatur für unterschiedliche Schneidstoffe sowie mit/ohne Werkzeugbeschichtung an Werkstück 1 bei V_{f3}	117
Abbildung 5.34: Lineare Regression Drehzahl und Temperaturentwicklung für KSB1 – KSB3 an Werkstück 1 bei V_{f3}	118
Abbildung 5.35: Vergleich Schnittkraft für unterschiedliche Schneidstoffe sowie mit/ohne Werkzeugbeschichtung an Werkstück 1 bei V_{f3}	119
Abbildung 5.36: Schnittkraftentwicklung für KSB2 (HSS) in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl an Werkstück 1.....	121
Abbildung 5.37: Maximale Temperatur in Abhängigkeit der Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit an Werkstück 1 mit KSB2 (HSS, TiAlN).....	121
Abbildung 5.38: Schematische Darstellung des Prototyps zur Rohrintrennung, nach [145, S. 17].....	126
Abbildung 5.39: Schematische Darstellung Prototyp an Mobilkran [145, S. 23].....	127
Abbildung 5.40: Versuchsdurchführung mit Prototyp an - links: Werkstück C; rechts: Werkstück B	128
Abbildung 5.41: links: Trennvorgang mit Scheibenfräser; mittig: Spanbildung; rechts: abgetrenntes Rohrsegment	128

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Alterungsbedingte Schadensfälle bei druckführenden Komponenten, nach [8, S. 287].....	17
Tabelle 2.2: Zugelassene Werkstoffe für Rohrleitungen in Kernkraftwerken gemäß KTA-Regelwerk.....	19
Tabelle 3.1: Merkmale der Fertigungsverfahren und Einteilung in Hauptgruppen, nach [55, S. 7].....	23
Tabelle 4.1: Steuergrößen nach Parametergruppen, nach [9, S. 37]	34
Tabelle 4.2: Daten Scheibenfräser experimentelle Versuchsreihen.....	40
Tabelle 4.3: Daten Kreissägeblätter experimentelle Versuchsreihen.....	41
Tabelle 4.4: Daten Trennscheiben experimentelle Versuchsreihen	46
Tabelle 4.5: Umrechnung der Betriebsgeschwindigkeit gemäß DIN EN 12413, nach [107, S. 59].....	47
Tabelle 4.6: Daten freiliegende Werkstücke	48
Tabelle 4.7: Chemische Zusammensetzung austenitischer korrosionsbeständiger Stähle in Massenprozent gemäß DIN EN 10088-3, nach [109, S. 14-16]	50
Tabelle 4.8: Chemische Zusammensetzung Werkstoffnummer 1.0345 gemäß DIN EN 10028-2, nach [113, S. 7].....	51
Tabelle 4.9: Daten einbetoniertes Werkstück	52
Tabelle 4.10: Umrechnung Vorschubgeschwindigkeit	57
Tabelle 4.11: Schalterstellung und Drehzahl MOVIMOT Stirnradgetriebemotor.....	58
Tabelle 4.12: Messtechnik für experimentelle Untersuchungen, nach [9, S. 55].....	61
Tabelle 4.13: Faktoren und Stufenwerte für die Versuchsplanerstellung, nach [9, S.56].....	71
Tabelle 5.1: Zuordnung der Forschungsfragen zur Ergebnisdarstellung, nach [9, S. 58].....	73
Tabelle 5.2: Stufenwerte Vorversuche mit TS1 (CER).....	75
Tabelle 5.3: Stufenwerte Hauptversuche TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D)	76
Tabelle 5.4: Angaben zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für Vorschubgeschwindigkeit und Volumenabtrag (TS1 (CER)/Werkstück 2).....	81
Tabelle 5.5: Angaben zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für Vorschubgeschwindigkeit und Schnittkraft (TS1 (CER)/Werkstück 2)	82
Tabelle 5.6: Angaben zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für Vorschubgeschwindigkeit und Massenverlust (TS1 (CER)/Werkstück 2)	93
Tabelle 5.7: Staubkonzentration (Durchschnitt und Maximum) von TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 1	99
Tabelle 5.8: Betriebsparameterwahl und Anwendungsempfehlungen Trennscheiben	107

Tabelle 5.9: Stufenwerte Vorversuche mit KSB1 (HSS).....	109
Tabelle 5.10: Stufenwerte Hauptversuche Scheibenfräser (SF1) und Kreissägeblätter (KSB1-3).....	111
Tabelle 5.11: Standardabweichung Wärmeentwicklung SF1 (HSS) und KSB1 (HSS).....	113
Tabelle 5.12: Standardabweichung Schnittkraft SF1 (HSS) und KSB1 (HSS)	114
Tabelle 5.13: Betriebsparameterwahl und Anwendungsempfehlungen Kreissägeblätter/Scheibenfräser.....	125
Tabelle 5.14: Daten Werkstücke Validierungsversuche	127

Abkürzungsverzeichnis

AGW	Arbeitsplatzgrenzwert
ASGW	Allgemeiner Staubgrenzwert
AtG	Atomgesetz
BF	Bauform
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGZ	Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BTB	Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V.
CBN	Cubic Boron Nitride; dt. kubisch kristallines Bornitrid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	Nennweite
DWR	Druckwasserreaktor
EN	Europäische Norm
EnBW	Energie Baden-Württemberg AG
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GKN I	Gemeinschaftskernkraftwerk Neckarwestheim, Block I
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
HK	Knoop Härte
HM	Hartmetall
HSS	High Speed Steel; dt. Schnellarbeitsstahl
IAEA	International Atomic Energy Agency; dt. Internationale Atomenergie-Organisation
INES	International Nuclear and Radiological Event Scale; dt. Internationale Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse
ISO	International Organization for Standardization; dt. Internationale Organisation für Normung

IQR	Interquartilsrange; dt. Interquartilsabstand
KGR	Kernkraftwerk Greifswald
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KMK	Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich
KSB1	Kurzbezeichnung Kreissägeblatt 1, Schneidstoff HSS
KSB2	Kurzbezeichnung Kreissägeblatt 2, Schneidstoff HSS, Beschichtung TiAlN
KSB3	Kurzbezeichnung Kreissägeblatt 3, Schneidstoff VHM, Beschichtung TiAlN
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
RDB	Reaktordruckbehälter
RoTre	Akronym für das Projekt „Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrrinnen-trenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen“
SF1	Kurzbezeichnung Scheibenfräser 1, Schneidstoff HSS
SI	Système international d'unités; dt. Internationales Einheitensystem
StandAG	Standortauswahlgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SWR	Siedewasserreaktor
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
TMB	Institut für Technologie und Management im Baubetrieb
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TS1 (CER)	Kurzbezeichnung Trennscheibe 1, Schleifmittel Keramik
TS2 (A)	Kurzbezeichnung Trennscheibe 2, Schleifmittel Korund
TS3 (D)	Kurzbezeichnung Trennscheibe 3, Schleifmittel Diamant
$V_{f0} - V_{f6}$	Kurzbezeichnung Vorschubgeschwindigkeiten
VHM	Vollhartmetall

Einheiten- und Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
b	[mm]	Schnitt-/Scheibenbreite
b	[-]	Schnittpunkt y-Achse
$^{\circ}\text{C}$	[-]	Grad Celsius
cm	[-]	Zentimeter
d_1	[mm]	Scheiben-/Werkzeugdurchmesser
d_2	[mm]	Bohrungsdurchmesser
d_A	[mm]	Außendurchmesser Rohr
d_i	[mm]	Innendurchmesser Rohr
f	[Hz]	Frequenz
g	[-]	Gramm
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung (= 9,81 m/s ²)
Hz	[-]	Hertz
kg	[-]	Kilogramm
kg/m ³	[-]	Kilogramm pro Kubikmeter
kN	[-]	Kilonewton
l/min	[-]	Liter pro Minute
m	[-]	Meter
m	[-]	Geradensteigung
mg/m ³	[-]	Milligramm pro Kubikmeter
min ⁻¹	[-]	Umdrehungen pro Minute
mm	[-]	Millimeter
m/min	[-]	Meter pro Minute
mm/min	[-]	Millimeter pro Minute

m/s	[-]	Meter pro Sekunde
m/s ²	[-]	Meter pro Quadratsekunde
n	[min ⁻¹]	Antriebsdrehzahl/Drehzahl
<i>n</i>	[-]	Anzahl der Einzelwerte
N	[-]	Newton
Nm	[-]	Newtonmeter
N/mm ²	[-]	Newton pro Quadratmillimeter
r	[-]	Pearson Korrelationskoeffizient
R ²	[-]	Bestimmtheitsmaß
s	[-]	Sekunde
t	[-]	Tonne
<i>T</i>	[s]	Periodendauer
<i>V_c</i>	[m/s]	Umfangs-/Schnittgeschwindigkeit
<i>V_f</i>	[mm/min]	Vorschubgeschwindigkeit
w	[mm]	Wandstärke Rohr
\bar{x}, \bar{y}	[*]	Arithmetische Mittel
Z	[-]	Zähnezahl

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
ε	[-]	Emissionsgrad
μg/m ³	[-]	Mikrogramm pro Kubikmeter
μm	[-]	Mikrometer
π	[-]	Kreiszahl PI (≈ 3,14)
σ	[*]	Standardabweichung

*: Entspricht der Einheit der zugrundeliegenden Daten.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) im Fachbereich Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes für die Übernahme des Hauptreferates und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.sc.agr. Kurt Heppler für die Übernahme des Korreferates bedanken. Vielen Dank für das entgegengebrachte Vertrauen und die fachliche Unterstützung bei der Anfertigung meiner Promotion.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Kunibert Lennerts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Shervin Haghsheno für die Teilnahme an der Promotionskommission.

Außerdem bedanke ich mich allen meinen Kolleginnen und Kollegen am TMB, die mich während der gesamten Zeit meiner Promotion unterstützt haben und mir mit Wissen, Lob und Kritik zur Seite standen. Namentlich erwähnen an dieser Stelle möchte ich Jonas Ruoff, Carla-Olivia Krauß, Alexander Heneka, Michael Pfau und Remo Langlotz.

Die Umsetzung und das Gelingen meiner Arbeit wäre ohne die technischen Mitarbeitenden in der mechanischen Werkstatt des TMB nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt daher Michael Fritz, Sven Fuhrmann, Jürgen Hauth und Torsten Schuler.

Bedanken möchte ich mich außerdem bei allen Projektbeteiligten und Mitwirkenden im Forschungsprojekt „RoTre“.

Abschließend bedanke ich mich für die Unterstützung meiner ganzen Familie während der Anfertigung meiner Promotion.

Karlsruhe, im Juli 2024

Madeleine Bachmann

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Kernkraftwerke müssen nach Ablauf ihrer betrieblichen Nutzung zur Stromerzeugung stillgelegt und zurückgebaut werden. In Deutschland wird der direkte Rückbau, d.h. der unverzügliche Abbau der Anlage nach Erteilung der Stilllegungsgenehmigung, verfolgt. Ziel ist der Rückbau bis zur „Grünen Wiese“ und das Wiederherstellen des ursprünglichen Zustandes vor dem Bau des Kraftwerkes. [2] Die letzten drei im Betrieb befindlichen Anlagen in Deutschland – Emsland, Isar 2 und Neckarwestheim 2 – mussten bis zum 15. April 2023 abgeschaltet werden [1].

Erfolgreich durchgeführte und abgeschlossene nationale Rückbauprojekte wie der Heißdampfreaktor Großwelzheim, das Kernkraftwerk Niederaichbach und das Versuchsatomkraftwerk Kahl wie auch die Fortschritte bei laufenden Projekten zeigen, dass nukleare Anlagen aus technischer und organisatorischer Sicht sicher stillgelegt und zurückgebaut werden können [3]. Je Anlage kann mit Kosten von ca. 1 Milliarde Euro und mit einem Zeitraum von 10 - 15 Jahren für den Rückbau gerechnet werden [4]. Allerdings braucht es neue Technologien, um die Rückbauarbeiten effektiver, kostengünstiger und sicherer für die am Rückbau beteiligten Personen durchführen zu können. Ein spezielles Forschungsgebiet stellen Zerlegetechniken für von außen schwer zugängliche Rohrleitungen dar. Die Gesamtmasse an rückzubauenden Rohrleitungen variiert je nach Anlage, kann jedoch am Beispiel des Kernkraftwerks Mülheim-Kärlich (KMK) abgeschätzt werden. Im KMK entfallen von 500.000 t anfallenden Abbaumassen mehr als 63 t auf Rohrleitungen. Eine differenziertere Unterscheidung in von außen zugängliche und nicht zugängliche Rohrleitungen ist aufgrund der Datengrundlage nicht möglich. Der größte Anteil der anfallenden Abbaumassen entfällt auf Betonstrukturen. [5, S. 10]

Nach aktuellem Stand der Technik existieren auf dem Markt vorwiegend Geräte zur Rohraußentrennung wie beispielsweise diverse Rohrtrennmaschinen, orbitale Rohrsägen oder Winkelschleifer mittels Trennscheiben. Die Geräte wurden für den konventionellen Bereich entwickelt und sind größtenteils auf bestimmte Durchmesser, Wandstärken und Materialien der zu trennenden Rohrleitungen begrenzt. Im Bereich der Rohrintrennung gibt es vorwiegend diverse Sonderlösungen für gewisse Anwendungsfälle oder Systeme, die mittels einem drehendem Fertigungsverfahren Rohre von innen trennen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden daher ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen zu den drei spanenden Fertigungsverfahren Sägen, Fräsen und Trennschleifen mit rotierendem Werkzeug (kurz: Schleifen) an unterschiedlichen Werkstücken durchgeführt und die Betriebsparameter analysiert. Die Randbedingungen und Einflussgrößen der zu untersuchenden Rohrleitungen beziehen sich auf verbaute Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen. Prinzipiell lassen sich die Untersuchungen jedoch auch auf den konventionellen Rückbau und Rohrleitungsbau übertragen.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Der Ausstieg Deutschlands aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung und der damit verbundene nukleare Rückbau sowie die zu optimierenden Techniken auf dem Gebiet der Rohrinrentrennung kennzeichnen die Motivation für die vorliegende Arbeit. In der Bundesrepublik befinden sich aktuell 27 Leistungs- und Prototypreaktoren in der Stilllegung bzw. im Rückbau [1]. Weltweit betrachtet sollen bis zum Jahr 2030 insgesamt 297 Kernkraftwerke, wovon sich 165 Anlagen in Europa befinden, in den Rückbau gehen [6]. Im Gegensatz zu Deutschland halten jedoch zahlreiche Länder, wie beispielsweise Frankreich, die Niederlande und Polen, weiterhin an der Kernenergie fest [7]. Während der Nutzungsdauer kann es im laufenden Betrieb zu alterungsbedingten Schadensfällen und damit verbunden zu notwendigen Reparaturen kommen. *Laufs* zufolge [8, S. 266] entfallen von insgesamt 492 erfassten Schadensfällen an Komponenten eines Druckwasserreaktors (DWR) und Siedewasserreaktors (SWR) ca. 90 Schadensfälle auf Rohrleitungen. Weitere Schadensfälle traten z.B. an Turbinen, Filtern und Generatoren auf. Eine effiziente Technik zur Rohrinrentrennung, durch welche der Arbeitsaufwand für das Bedienpersonal unter Beachtung der geltenden Sicherheitsanforderungen in kerntechnischen Anlagen reduziert werden kann, ist daher nicht nur für den Rückbau von Kernkraftwerken, sondern auch für die im Betrieb befindlichen Anlagen relevant.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Untersuchung der Betriebsparameter zur Entwicklung eines Rohrinrentrennsystems¹ für schwer zugängliche Rohrleitungen durch Scheibenfräser, Kreissägeblätter und Trennscheiben. In diesem Zusammenhang ergeben sich die drei folgenden Forschungsfragen:

1. Welchen Einfluss haben unterschiedliche Rohrleitungen hinsichtlich Durchmesser und Material in nahtloser und geschweißter Ausführung in verschiedenen Einbaulagen (freiliegend, einbetoniert) auf die Rohrinrentrennung mittels spanender Trennwerkzeuge?
2. Mit welchem der drei untersuchten spanenden Trennwerkzeuge – Scheibenfräser, Kreissägeblätter und Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik, Korund und Diamant – kann ein kontinuierlicher Volumenabtrag und damit eine zur Rohrinrentrennung notwendige Schnittgüte, unter dem Gesichtspunkt der Verschleißoptimierung, erreicht werden?
3. Wie sind werkzeugabhängig die Betriebsparameter (Vorschub- und Umfangsgeschwindigkeit) für eine neuartige Rohrinrentrennvorrichtung zu wählen?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden experimentellen Versuchsreihen zur Rohrinrentrennung an einem eigens hierfür entwickelten Versuchsstand durchgeführt und wissenschaftlich ausgewertet. Die Forschungsfragen werden je Trennwerkzeug durch die definierten Zielgrößen Schnittkraft, Volumenabtrag, Massenverlust und Wärmeentwicklung an der Werkzeugschneid analysiert. Bei Trennscheiben wird zusätzlich noch die maximale und durchschnittliche Staubkonzentration während der Rohrinrentrennung untersucht.

¹ Die reine Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit einer Rohrinrentrennvorrichtung ist nicht Teil dieser Dissertation.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist gemäß dem Ablaufdiagramm in Abbildung 1.1 aufgebaut. Nach einer Einführung im ersten Kapitel folgen in Kapitel 2 die Grundlagen zur Demontage von Rohrleitungen einschließlich der Angaben zu verbauten Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen hinsichtlich Rückbaumassen, Durchmesser, Material und Einbaulagen etc. Anschließend wird im dritten Kapitel der Stand der Technik zur Rohrrennung erläutert sowie eine Eingrenzung und Einordnung der zu untersuchenden Fertigungsverfahren vorgenommen. Das vierte Kapitel gibt die experimentellen Versuchsreihen zur Rohrintrennung wieder. Zu Beginn erfolgt eine Systembeschreibung anhand welcher u.a. die zu untersuchenden Werkzeuge und Werkstücke wie auch die Zielgrößen definiert werden. Im weiteren Verlauf von Kapitel 4 wird der Aufbau des Versuchsstandes, die Auswahl der Messtechnik und die Methodik für die Datenauswertung wie auch die Versuchsplanung thematisiert. Kapitel 5 behandelt die Ergebnisse und die Datenauswertung der experimentellen Versuchsreihen durch welche die zuvor definierten Forschungsfragen beantwortet werden. Zusätzlich wird im fünften Kapitel der Prototyp zur Rohrintrennung, welcher auf Basis der durchgeführten Versuchsreihen und mit den damit verbundenen Werkzeugparametern im Projekt „RoTre“ entwickelt wurde, vorgestellt und die Praxistauglichkeit durch Validierungsversuche nachgewiesen. Abschluss der Arbeit bildet eine Zusammenfassung in Kapitel 6.

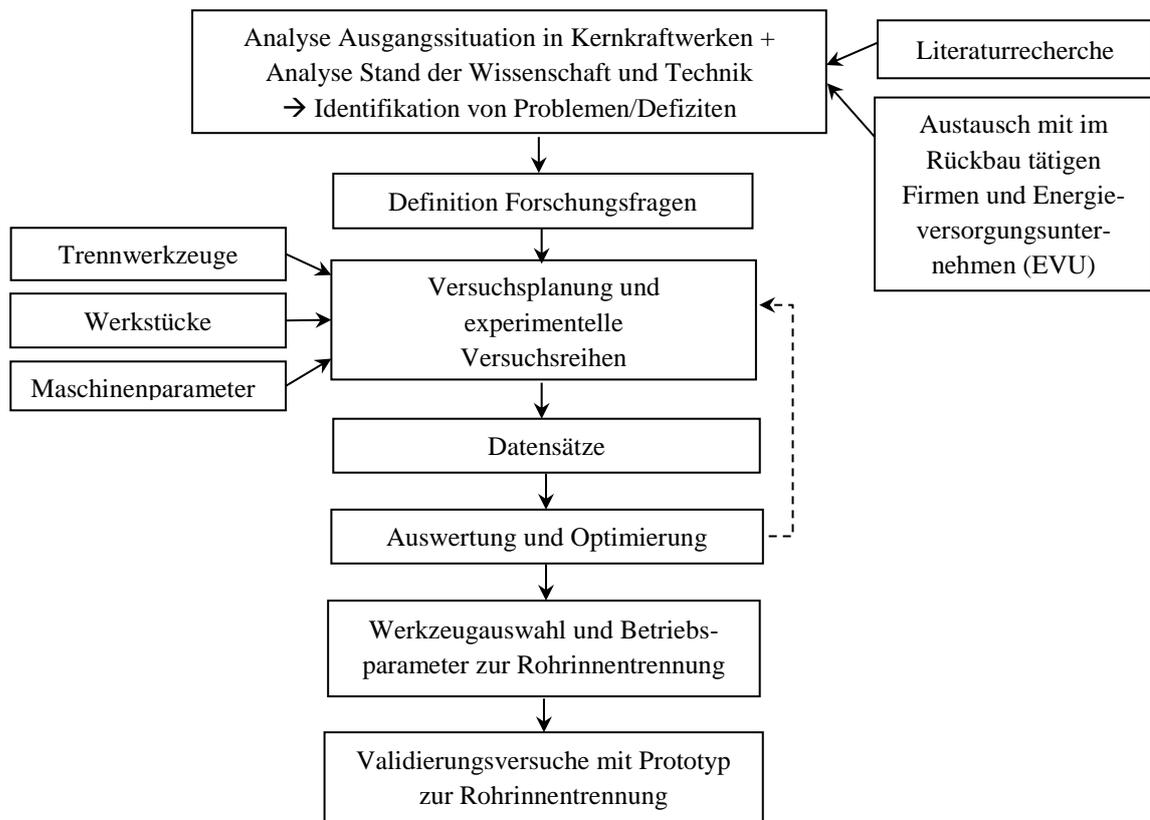


Abbildung 1.1: Ablaufdiagramm Forschungsprozess, nach [9, S. 3]

2 Demontage von Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen

In Kapitel 2 wird eingangs eine kurze Einführung in den Ausstieg aus der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland und in den Rückbau von Kernkraftwerken gegeben. Anschließend folgen Praxisbeispiele von verbauten Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen². In diesem Zusammenhang werden u.a. Daten zu verwendeten Werkstoffen, Durchmessern und Wandstärken in kerntechnischen Anlagen behandelt. Die Zusammenstellung der Daten basiert auf einer Literaturrecherche und wurde durch Daten von im Rückbau tätigen Firmen vervollständigt. Die Daten sind maßgeblich für die Auswahl der Werkstücke (vgl. Absatz 4.3) zur Durchführung der experimentellen Versuchsreihen. Ebenfalls Inhalt von Kapitel 2 sind die Funktionsweise von Leichtwasserreaktoren und alterungsbedingte Schadensfälle an Rohrleitungen.

2.1 Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland

Ausschlaggebend für den Ausstieg aus der Kernenergie war die Reaktorkatastrophe in Fukushima, Japan am 11. März 2011. Infolge eines Seebebens im Pazifik wurde ein Tsunami ausgelöst, der die Ostküste Japans traf und zu einer Kernschmelze in drei Reaktorblöcken im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi führte. Auf der internationalen Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse (INES) der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA) wurde der Reaktorunfall in die siebte und damit höchste Stufe „katastrophaler Unfall“ eingeordnet. [10]

Bereits am 14. März 2011 entschied die Bundesregierung, dass der Leistungsbetrieb der Kernkraftwerke, die bis einschließlich des Jahres 1980 in Betrieb gingen, einzustellen ist [11]. Mit Inkrafttreten der Änderung des Atomgesetzes (AtG) am 06. August 2011 wurde für jede Anlage definiert, wann „die Berechtigung zum Leistungsbetrieb einer Anlage zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität erlischt [12].“ Dies ist nach § 7 Abs. 1a AtG der Fall, wenn die im AtG aufgeführte Elektrizitätsmenge erzeugt wurde, jedoch spätestens mit:

- „Ablauf des 6. August 2011 für die Kernkraftwerke Biblis A, Neckarwestheim 1, Biblis B, Brunsbüttel, Isar 1, Unterweser, Philippsburg 1 und Krümmel,
- Ablauf des 31. Dezember 2015 für das Kernkraftwerk Grafenrheinfeld,
- Ablauf des 31. Dezember 2017 für das Kernkraftwerk Gundremmingen B,
- Ablauf des 31. Dezember 2019 für das Kernkraftwerk Philippsburg 2,

² Kerntechnische Anlagen umfassen abgesehen von Leistungs- und Forschungsreaktoren auch sonstige radioaktive Anlagen. Unter Letztere fallen z.B. Anlagen zur Herstellung radioaktiver Isotope. [33, S. 205]

- Ablauf des 31. Dezember 2021 für die Kernkraftwerke Grohnde, Gundremmingen C und Brokdorf,
- Ablauf des 31. Dezember 2022 für die Kernkraftwerke Isar 2, Emsland und Neckarwestheim 2.“

Die Abschaltung der letzten drei Kernkraftwerke – Isar 2, Emsland und Neckarwestheim 2 – wurde erst am 15.04.2023 vollzogen und nicht wie ursprünglich beschlossen bis zum 31.12.2022. Hintergrund hierfür waren der Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine und die dadurch hervorgerufenen neuen Diskussionen über die Energieversorgung und eine mögliche Laufzeitverlängerung der Kraftwerke in Deutschland. Schließlich wurden die drei Kernkraftwerke durch einen Beschluss des Bundestages in einen befristeten Streckbetrieb bis längstens Mitte April 2023 überführt. [11] Der Streckbetrieb ist mit keiner zusätzlichen Stromerzeugung verbunden, die Leistung wird lediglich zeitlich verzögert bereitgestellt [13].

Letztendlich waren weltweit gewonnene Erkenntnisse über den Betrieb eines Kernkraftwerkes und die damit verbundene Entsorgung der radioaktiven Abfälle entscheidend für den Ausstieg aus der Nutzung der Kernkraftwerke zur Stromerzeugung in Deutschland. Aus rechtlichen, technischen und betriebswirtschaftlichen Gründen wäre ein Weiterbetrieb der Anlagen nicht möglich. [13]

Die vier Energieversorgungsunternehmen – Arbeitsgemeinschaft (AG) Energie Baden-Württemberg (EnBW), die RWE (bis 1990 Rheinisch Westfälisches Elektrizitätswerk) AG, die PreussenElektra GmbH und Vattenfall GmbH – tragen die Kosten für den Rückbau ihrer Anlagen und sind für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle verantwortlich. Die Unternehmen haben hierfür Rückstellungen gebildet. [14]

2.2 Rückbau eines Kernkraftwerkes

Weltweit betrachtet gibt es mit dem direkten Rückbau und dem sicheren Einschluss zwei Wege, Kernkraftwerke zurückzubauen. Bei einem sicheren Einschluss wird die Anlage erst nach mehreren Jahrzehnten zurückgebaut und die Verringerung der Radioaktivität³ durch den natürlichen Zerfallsprozess ausgenutzt. Beim direkten Rückbau, welcher in Deutschland verfolgt und gesetzlich vorgeschrieben ist, beginnt der Rückbau zeitnah nach der Abschaltung der Anlage und der Erteilung der Stilllegungsgenehmigung. Bei diesem Vorgehen kann auf das Fachwissen der im Leistungsbetrieb tätigen Personen und auf die vorhandene Infrastruktur zurückgegriffen werden. Zudem kann der Standort der Anlage früher in seinen Ausgangszustand vor dem Bau des Kernkraftwerkes zurückversetzt werden. Letzteres wird als Rückbau bis zur „Grünen Wiese“ bezeichnet. Eine konventionelle Nutzung der Gebäude nach der Entlassung des Kernkraftwerkes aus der atomrechtlichen Überwachung ist ebenfalls möglich. [15], [16]

³ Unter Radioaktivität wird gemäß dem *Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)* [153] die „Eigenschaft bestimmter Atomkerne, sich ohne äußere Einwirkungen in andere Kerne umzuwandeln und dabei energiereiche Strahlung auszusenden“, verstanden.

Ein umfangreiches Genehmigungsverfahren stellt sicher, dass die Anforderungen an den Strahlenschutz während des Rückbaus eingehalten und mögliche Auswirkungen auf die Umwelt berücksichtigt werden. Rechtsgrundlage für den Abbau eines Kernkraftwerks oder von Anlagenteilen wie auch für die Genehmigung der Stilllegung ist § 7 Abs. 3 des AtGs. [17], [18, S. 4]

In Abbildung 2.1 ist der Rückbau eines Kernkraftwerkes ab Erteilung der Stilllegungsgenehmigung über die Demontage von Anlagenteilen und die Freimessung der Gebäude bis zur Entlassung der Anlage aus dem AtG dargestellt. Ebenfalls abgebildet ist der sich daran anschließende konventionelle Rückbau eines Kernkraftwerkes bis zur „Grünen Wiese“. Bevor eine Anlage aus der atomrechtlichen Überwachung entlassen werden kann, müssen alle Anlagenteile und Komponenten von innen nach außen demontiert, dekontaminiert und freigemessen bzw. für eine Endlagerung in die entsprechenden Behälter verpackt werden. Je nach Anlage müssen nur ca. 1 - 3 % der Gesamtmasse eines Kernkraftwerkes als radioaktiver Abfall für die Einlagerung in einem Endlager vorbereitet werden [16]. Im Folgenden wird zunächst der Ablauf des Freigabeverfahrens und anschließend, in Absatz 2.2.3, die Endlagerung radioaktiver Abfälle behandelt.



Abbildung 2.1: Ablauf Rückbau eines Kernkraftwerkes, nach [19]

2.2.1 Freigabeverfahren

Der schematische Ablauf des Freigabeprozesses von Anlagenteilen ist in Abbildung 2.2 zu sehen. Nach einer Voruntersuchung, in welcher die Art und Höhe der radioaktiven Kontamination⁴ festgestellt wird, folgt die Demontage, sprich der Abbau von Anlagenteilen. Bei einer vorherrschenden höheren Radioaktivität werden die demontierten Anlagenteile in den entsprechenden Abfallgebinden für die Zwischenlagerung an die Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ) übergeben. Bei Materialien mit einer geringeren Radioaktivität schließen sich die Reststoffbehandlung, die Orientierungs- und Entscheidungsmessung sowie bei Unterschreitung der Freigabewerte die Freigabe und damit die Entlassung aus der atomrechtlichen Überwachung an. Der gesamte Freigabeprozess wird durch Sachverständige und eine Aufsichtsbehörde begleitet. [20, S. 2]

Grundlage für die Freigabe von radioaktiven Stoffen und Gegenständen bildet die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [18, S. 4]. Werden im Freigabeprozess die geltenden Freigabegrenzen nach § 31 - 42 der StrlSchV [18, S. 4] unterschritten, sollen radiologisch unbedenkliche Stoffe zurück in den Wertstoffkreislauf geführt oder ordnungsgemäß entsorgt werden. Radiologisch unbedenklich bedeutet, dass die ausgehende Strahlung von Reststoffen sich im Bereich von einigen 10 Mikrosievert pro Person und Jahr befindet. Auf diese Weise wird dem Grundsatz der Abfallminimierung des deutschen Abfallrechts Folge geleistet. [20, S. 1]

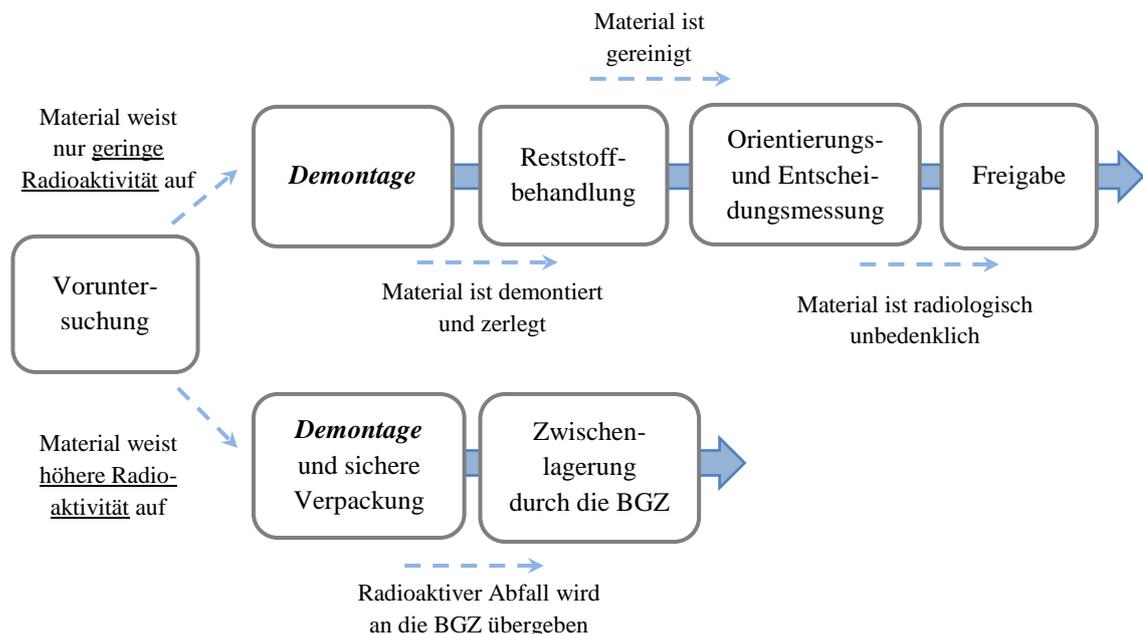


Abbildung 2.2: Ablauf Freigabeverfahren, nach [20, S. 2]

⁴ Kontamination bezeichnet die Verunreinigung durch radioaktive Stoffe. Die Oberflächen von Komponenten die kontaminiert sind, können beispielsweise durch Abwaschen oder Abschleifen gesäubert werden. Die darunterliegenden Schichten sind frei von Kontamination. Dieser Vorgang wird als Dekontamination bezeichnet. [16]

Die vorliegende Arbeit setzt im **Schritt der Demontage** von Anlagenteilen an. Durch die Grundlagenuntersuchungen zur Rohrintrennung und der darauf aufbauenden Entwicklung eines Rohrintrennsystems für verschiedene Durchmesser und Werkstoffe soll die Demontage von Rohrleitungen für die am Rückbau beteiligten Personen effektiver und leichter handhabbar gestaltet werden. Nach einer erfolgreichen Demontage der von außen nicht oder nur schwer zugänglichen Rohre durch ein Rohrintrennsystem können die rückgebauten Rohrleitungen im Schritt der Reststoffbehandlung, sofern die Rohrleitungen nur eine geringe Radioaktivität aufweisen, zerkleinert und dekontaminiert werden. Abbildung 2.3 zeigt die Dekontamination von demontierten Rohrleitungen sowie die in Gitterboxen vorbereitete Rohrleitungen zur Freimessung in einer Freimessanlage.

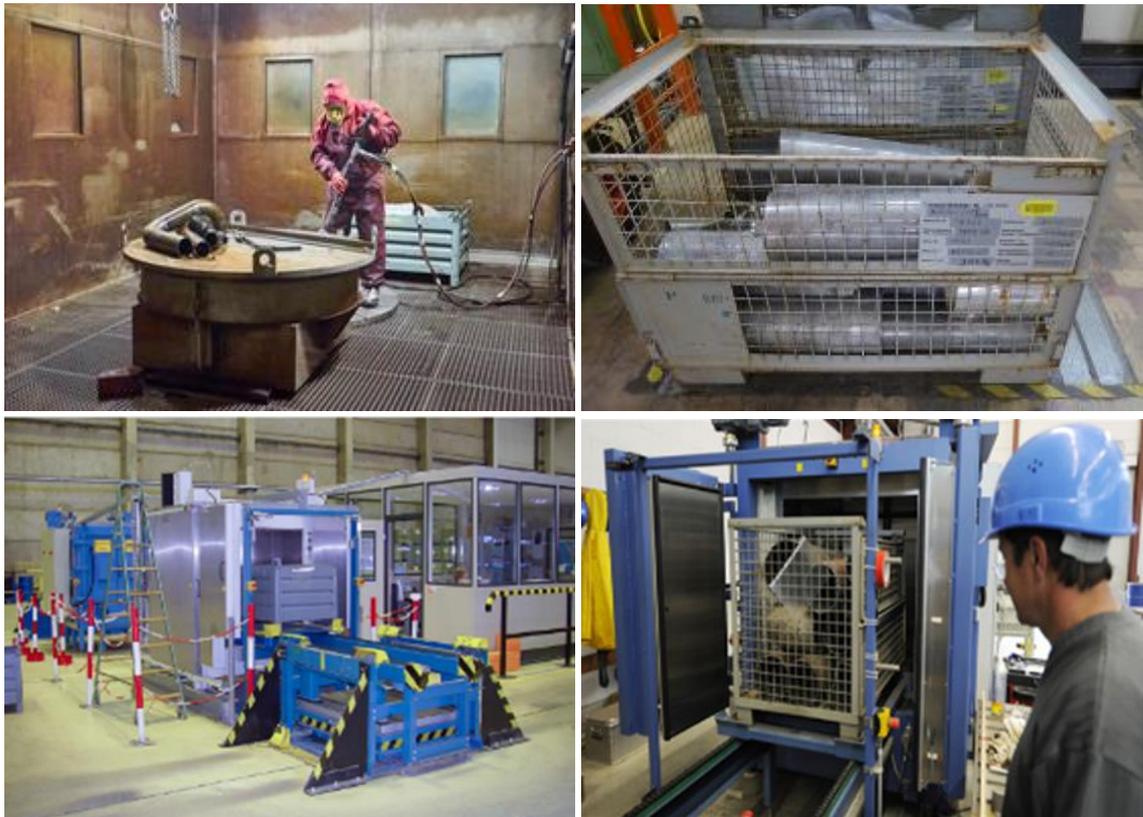


Abbildung 2.3: v.l.n.r.: Dekontamination von Rohrleitungen mittels Dampf-Hochdruck [21]; Gitterboxen mit Rohrleitungen [22]; Freimessanlage [23, S. 9]; Entscheidungsmessung von Rohrleitungen in einer Freimessanlage [24]

2.2.2 Demontage- und Zerlegetechniken

Die Demontage von Anlagenteilen in Kernkraftwerken wird mittels mechanischen und thermischen Zerlegetechniken durchgeführt. Nach der *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH* [25, S. 22] wird bei den mechanischen Verfahren, die für Metalle und Baustrukturen geeignet sind, die Schnittfuge durch das mechanische Abtragen von Material erzeugt. Hierbei kommt es i.d.R. zur Span- und Staubbildung, welche ggf. durch Filter aufgefangen werden müssen. Thermische Verfahren hingegen schmelzen beispielsweise durch einen Lichtbogen, einen Laserstrahl oder eine Flamme das Material der zu demontierenden Anlagenteile

auf. Der geschmolzene Anteil wird anschließend mittels eines Gas- oder Wasserstroms bzw. durch die Schwerkraft aus der Schnittfuge gelöst. Thermische Verfahren kommen vergleichsweise häufiger bei Metallen als bei Beton zum Einsatz und sind mit Filter- und Absauganlagen zu betreiben, da durch das thermische Schneiden partikelförmige Emissionen erzeugt werden. [25, S. 22] Eine Übersicht der wichtigsten mechanischen und thermischen Zerlegetechniken gibt Abbildung 2.4. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zu den mechanischen Verfahren Sägen, Fräsen und Trennschleifen leisten. Auf die restlichen Verfahren, wie beispielsweise Wasser-Abrasivschneiden, Autogenes Brennschneiden oder Laserstrahlschneiden, wird im Folgenden nicht weiter eingegangen.

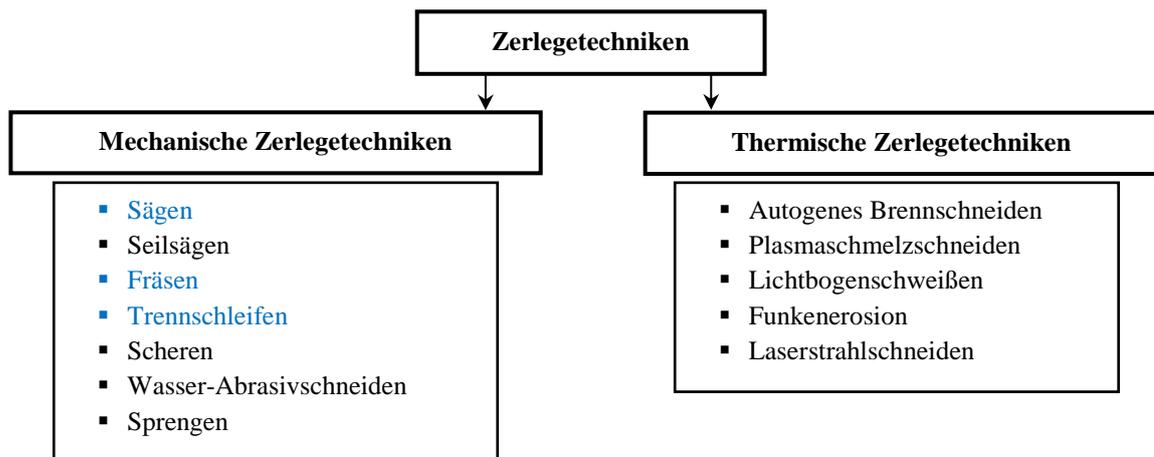


Abbildung 2.4: Übersicht mechanische und thermische Zerlegetechniken, nach [25, S. 22]

In Anlagenbereichen mit erhöhter Strahlung oder bei der Zerlegung hochaktiver Komponenten werden die Arbeiten fernhantiert und ggf. unter Wasser durchgeführt. Durch das Wasser kann die Strahlung der zu demontierenden Anlagenteile abgeschirmt und die Sicherheit für das Personal erhöht werden. Entscheidend für die Auswahl der Verfahren sind neben der Arbeitssicherheit für das Bedienpersonal die Schnittgeschwindigkeit, die maximal trennbare Materialdicke und die Freisetzung von Stäuben (Aerosolen). [25, S. 21]

2.2.3 Endlagerung radioaktiver Abfälle

Radioaktive Abfälle, die im Rahmen des Freigabeverfahrens nicht freigemessen werden können, müssen in ein Endlager überführt werden. Im Allgemeinen werden radioaktive Abfälle unterschieden in [26]:

- Hochradioaktive Abfälle (HAW: high active waste)
- Mittelradioaktive Abfälle (MAW: medium active waste)
- Schwachradioaktive Abfälle (LAW: low active waste)

In Deutschland sollen alle radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Schichten endgelagert werden. Entscheidend für die Endlagerung ist die Wärmeentwicklung der radioaktiven Abfälle. Demnach wird radioaktiver Abfall in der Bundesrepublik in **wärmeentwickelnde Abfälle** und Abfälle mit **vernachlässigbarer Wärmeentwicklung** unterschieden. Beispiele für Abfälle mit

vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sind u.a. Filter, ausgediente Anlagenteile und Komponenten wie Rohrleitungen und Pumpen, aber auch Werkzeuge und Schutzkleidung. Diese Abfälle beinhalten die schwachradioaktiven Abfälle und den Großteil der mittelradioaktiven Abfälle. [26], [27]

Wärmentwickelnde Abfälle, wie beispielsweise abgebrannte Brennelemente, weisen hohe Aktivitätskonzentrationen und eine daraus resultierende hohe Zerfallswärmeleistung auf. Hochradioaktive Abfälle wie auch ein Teil der mittelradioaktiven Abfälle lassen sich den wärmentwickelnden Abfällen zuordnen. [26]

Für die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle wurde im Jahr 2002 das erste nach Atomrecht genehmigte Endlager in Deutschland – die Schachanlage Konrad – durch das niedersächsische Umweltministerium genehmigt. Die Einlagerung der Abfallgebinde soll nach Fertigstellung der Umbauten des ehemaligen Eisenerzbergwerkes Anfang der 2030-er Jahre beginnen. [28] Betreiber der Schachanlage Konrad ist seit dem Jahr 2017 die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) [29].

Für hochradioaktive Abfälle gibt es in Deutschland derzeit kein Endlager. Die BGE ist mit der Suche eines geeigneten Standortes für ein Endlager, welches nach einem wissenschaftsbasierten und transparenten Verfahren, dem sogenannten Standortauswahlverfahren, abläuft, beauftragt. [21] Das Standortauswahlverfahren zielt darauf ab, „für die verursachten hochradioaktiven Abfälle den Endlagerstandort in Deutschland zu finden, der die bestmögliche Sicherheit für mindestens eine Million Jahre gewährleistet [30].“ Grundlage für das Verfahren ist das Standortauswahlgesetz (StandAG), das im Jahr 2013 in Kraft getreten ist [30].

Bis zur Verbringung der Abfallgebinde in ein Endlager werden die aus dem Betrieb und der Stilllegung von kerntechnischen Anlagen resultierenden radioaktiven Abfälle i.d.R. in dezentralen Zwischenlagern an den Standorten der Kraftwerke zwischengelagert. Die Verantwortung der Zwischenlagerung obliegt der BGZ, wohingegen die Finanzierung der Zwischen- und Endlagerung Aufgabe des Bundes ist. [31]

2.3 Rohrleitungen in Kernkraftwerken

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten eine Einführung in den Rückbau von Kernkraftwerken gegeben und eine Einordnung der vorliegenden Arbeit in den Schritt der Demontage erfolgte, wird im weiteren Verlauf von Kapitel 2 im Detail auf Rohrleitungen in Kernkraftwerken eingegangen. Bevor die Werkstoffe, Durchmesser und Wandstärken der in Kernkraftwerken verwendeten Rohrleitungen behandelt werden, werden die anfallenden Rückbaumassen und Praxisbeispiele von Rohrleitungen vorgestellt. Zudem wird die Funktion von Leichtwasserreaktoren erklärt und Schadensfälle von Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen thematisiert.

Rohrleitungen sind in der *Druckgeräterichtlinie* [32, S. 173] als „zur Durchleitung von Fluiden bestimmte Leitungsbauteile, die für den Einbau in ein Drucksystem miteinander verbunden sind,“ definiert. Werden einzelne Rohrleitungen zu einer Funktionseinheit zusammengefasst,

spricht man von einem Rohrleitungssystem. Maßgeblich hierfür sind u.a. der Durchflussstoff (z.B. Wasser) und der Zweck (z.B. Trinkwasser) wie auch der Nenndruck. [33, S. 2] Laut *Wossog* [33, S. 2] wird bei kerntechnischen Anlagen nicht zwischen Rohrleitung und Rohrleitungssystem differenziert. Die Begriffe werden in der vorliegenden Arbeit daher synonym verwendet.

2.3.1 Rückbaumassen und Praxisbeispiele Rohrleitungen

Beim Rückbau des KMK⁵ fällt nach *Hackel* [5, S. 6] eine Gesamtmasse von 500.000 t an. Hiervon sind 200.000 t dem konventionellen Bereich, wie z.B. Maschinenhaus und Kühlturm, und 300.000 t dem nuklearen Bereich zuzuordnen. Bei den Rückbaumassen aus dem nuklearen Anlagenbereich sind 284.000 t nicht verunreinigt und 13.000 t können nach einer entsprechenden Reinigung freigemessen werden. Weniger als 3.000 t müssen in den vorgesehenen Behältern in ein Endlager überführt werden.

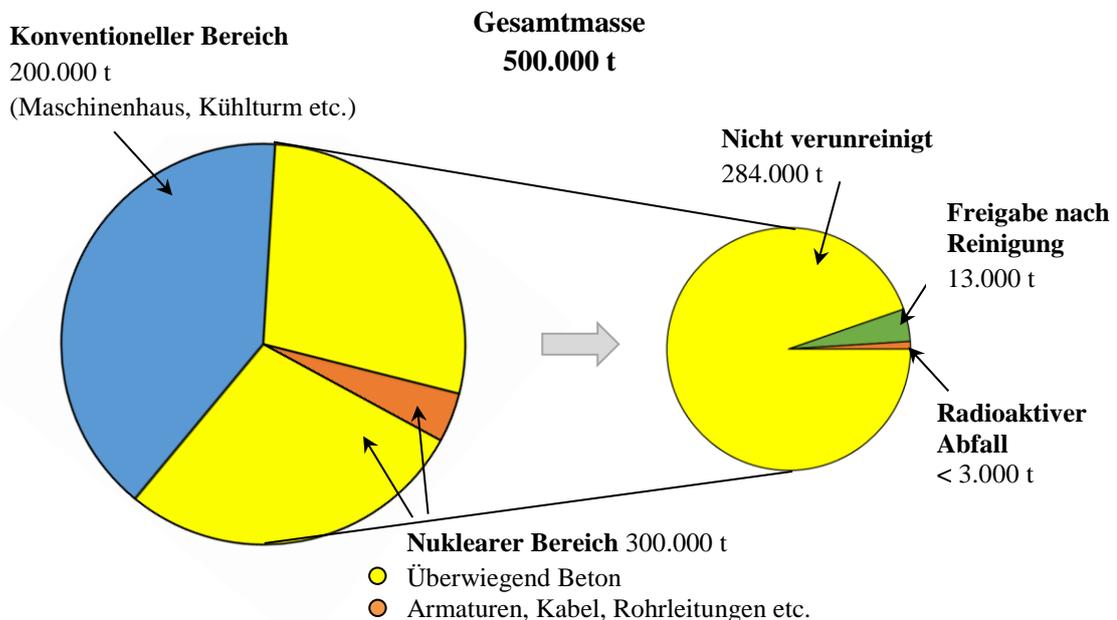


Abbildung 2.5: Rückbaumassen eines Kernkraftwerkes am Beispiel der Anlage KMK, nach [5, S. 6]

Abbildung 2.5 stellt die Rückbaumassen am Beispiel des KMK grafisch dar. Insgesamt sind im KMK mehr als 63 t Rohrleitungen zu demontieren [5, S. 10]. Anhand der Massen aus dem KMK ist eine Abschätzung der verbauten Rohrleitungen in Deutschland je Anlage und für den Bedarf einer Rohrintrennvorrichtung möglich. Differenziertere Angaben sind in der Literatur nicht verfügbar. Grundsätzlich ist eine Demontage erst ab dem Zeitpunkt möglich, zu welchem die Rohrleitungen inkl. der zugehörigen Komponenten nicht mehr für den Restbetrieb⁶ der Anlage benötigt werden [34, S. 19].

⁵ Das KMK ist ein Druckwasserreaktor. Dessen Funktion wird in Abschnitt 2.3.2.1. erläutert.

⁶ Unter Restbetrieb ist gemäß dem *Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach §7 des Atomgesetzes* [18, S. 28] der Betrieb „aller für die Stilllegung

Beispiele für Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen sind u.a. Hauptkühlmittel-, Speisewasser-, Frischdampf- sowie Not- und Nachkühlleitungen. Einen Einblick in die Vielzahl an unterschiedlichen Rohrleitungen, die zur Funktion eines Kernkraftwerkes notwendig sind, gibt das Maschinenhaus des Gemeinschaftskernkraftwerkes Neckarwestheim, Block I (GKN I) in Abbildung 2.6.



Abbildung 2.6: Rohrleitungen im Maschinenhaus des GKN I [35]

Abgesehen von freiliegenden Rohrleitungen, existieren in nuklearen Anlagen auch einbetonierte Rohrleitungen wie beispielsweise bei Gebäudeübergängen, in der Bodenplatte oder bei Wanddurchgängen. Beispiele für in Beton verlegte Rohrleitungen zeigen die nachfolgenden Abbildungen aus dem KMK bei einer Besichtigung der Anlage im Jahr 2021.



Abbildung 2.7: Einbetonierte Rohrleitungen im KMK; links/mittig: Rohrleitungen in Bodenplatte; rechts: Rohrleitungen in einer Wand

notwendigen Versorgungs- und Hilfssysteme sowie der Betrieb der für den Abbau von Komponenten, Systemen und Gebäuden notwendigen Einrichtungen nach Erteilung der Stilllegungsgenehmigung“ zu verstehen.

Der Fokus der Untersuchungen in dieser Dissertation liegt auf Leichtwasserreaktoren. Zum besseren Verständnis der Einbaulage der in den folgenden Kapiteln aufgeführten Rohrleitungen wird nachfolgend kurz der Aufbau und die Funktion von Leichtwasserreaktoren beschrieben.

2.3.2 Reaktortypen in Deutschland - Leichtwasserreaktoren

Weltweit gibt es verschiedene Reaktortypen, die zur Energieerzeugung verwendet werden. Die einzelnen Reaktortypen unterscheiden sich in dem eingesetzten Kernbrennstoff (wie z.B. Natururan oder angereichertes Uran-235), dem verwendeten Material für die Neutronenmoderation und dem Kühlmittel. Als Kühlmittel können neben Wasser auch Gase wie beispielsweise Helium oder Flüssigmetalle wie Natrium eingesetzt werden. [36]

Leichtwasserreaktoren, die in Druckwasserreaktoren (DWR) und Siedewasserreaktoren (SWR) unterschieden werden, sind die weltweit am häufigsten eingesetzten Reaktortypen. Bei diesen Anlagen wird Wasser als Kühlmittel und Moderator verwendet. Ein Moderator bremst die freien Neutronen, die bei der Kernspaltung entstehen, ab. In Deutschland waren beide Arten an Leichtwasserreaktoren im Betrieb. [36]

2.3.2.1 Funktion eines DWRs

Der DWR ist der am häufigsten eingesetzte Reaktortyp in Deutschland. Ein DWR besteht aus zwei unterschiedlichen Kreisläufen: dem Primär- und Sekundärkreislauf.

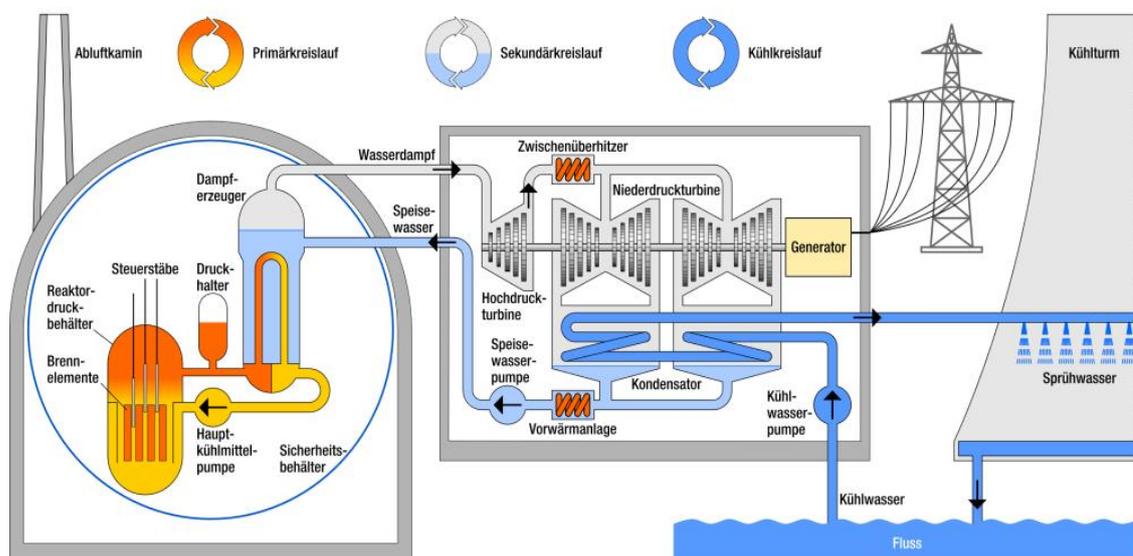


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung eines DWRs [37]

Die getrennten Kreisläufe führen dazu, dass radioaktive Stoffe lediglich im Primärkreislauf enthalten sind. Das Wasser im Primärkreislauf wird im Reaktordruckbehälter (RDB)⁷ über die

⁷ Der RDB enthält den Reaktorkern und die darin enthaltenen Brennelemente. Der aus speziellen Stahlegierungen gefertigte Behälter stellt eine der Sicherheitsbarrieren eines Kernkraftwerkes dar, die das Freiwerden radioaktiver Stoffe vermeiden sollen. [147]

in den Brennelementen erzeugte Energie aus der Kernspaltung auf 326 °C erhitzt. Ein Sieden des Wassers ist aufgrund eines Druckes von 157 bar nicht möglich. Wie in Abbildung 2.8 zu sehen, durchfließt das erhitzte Wasser anschließend die Heizrohre des Dampferzeugers. Im Dampferzeuger wird die Wärme, welche die Heizrohre umgibt, an das Wasser im Sekundärkreislauf übertragen. Auf diese Weise gelangt kein kontaminiertes Wasser aus dem Primär- in den Sekundärkreislauf, wodurch u.a. eine einfachere Wartung im Vergleich zu einem SWR möglich ist. Das abgekühlte Wasser im Primärkreislauf wird anschließend wieder in den RDB geleitet. Das Wasser im Sekundärkreislauf weist einen Druck von 64,5 bar auf und verdampft bei $280,5\text{ °C}$. Der erzeugte Dampf wird durch die Turbinen geleitet und die erzeugte Energie durch einen Generator in elektrischen Strom umgewandelt. Nach der Abkühlung des Dampfes wird dieser über einen Kondensator geleitet und anschließend als Wasser in den Dampferzeuger überführt. [37]

2.3.2.2 Funktion eines SWRs

Im Gegensatz zu einem DWR, wird ein SWR mit einem Kreislauf, dem Wasser-Dampf-Kreislauf, betrieben.

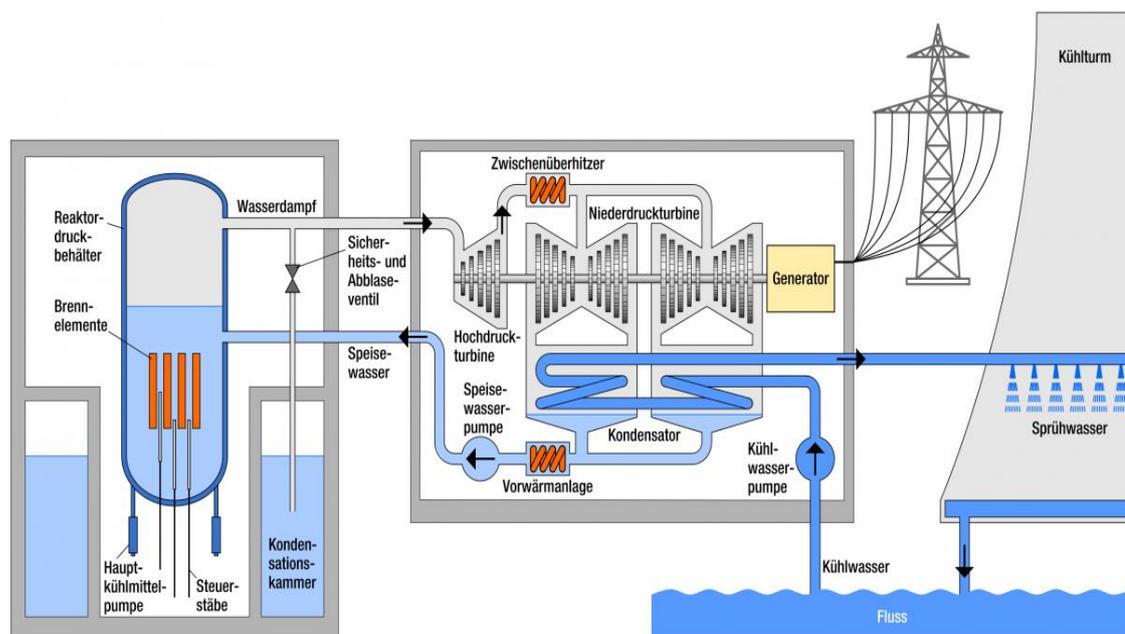


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung eines SWRs [38]

Die Wärme, die während der Kernspaltung in den Brennelementen erzeugt wird, erhitzt das Wasser im RDB auf bis zu 286 °C . Das Wasser beginnt im RDB zu sieden, der Druck im RDB liegt bei ca. 70 bar. Es entsteht Wasserdampf, der zur Verringerung des Wasseranteils durch spezielle Vorrichtungen im oberen Teil des RDB geführt wird. Danach anschließend wird der Dampf auf die Turbinen im Maschinenhaus geleitet und die Rotationsenergie der Turbine durch einen Generator in elektrischen Strom umgewandelt. Da der Antrieb der Turbine mit Dampf aus dem RDB erfolgt, gehört das Maschinenhaus eines SWRs dem Kontrollbereich an. Nachdem der Dampf die Turbinen durchströmt hat, wird das Wasser in Kondensatoren abgekühlt, das Wasser kondensiert und wird wieder in den RDB geleitet. In Abbildung 2.9 ist der beschriebene Vorgang schematisch dargestellt. [38]

2.3.3 Alterungsbedingte Schadensfälle an Rohrleitungen

Während der Laufzeit einer kerntechnischen Anlage, kommt es zu verschiedenen alterungsbedingten Schadensfällen an unterschiedlichen Komponenten, die eine Wartung und ggf. Instandsetzung erfordern, sodass ein sicherer Betrieb der Anlagen gewährleistet werden kann. Ausgehend von Abbildung 2.10, weisen Rohrleitungen, gefolgt von Dampferzeugern und Reaktordruckbehältern, die größte alterungsbedingte Schadenshäufigkeit an unterschiedlichen Komponenten bei DWRen und SWRen auf. Insgesamt wurden 492 Schadensfälle erfasst. [8, S. 266]

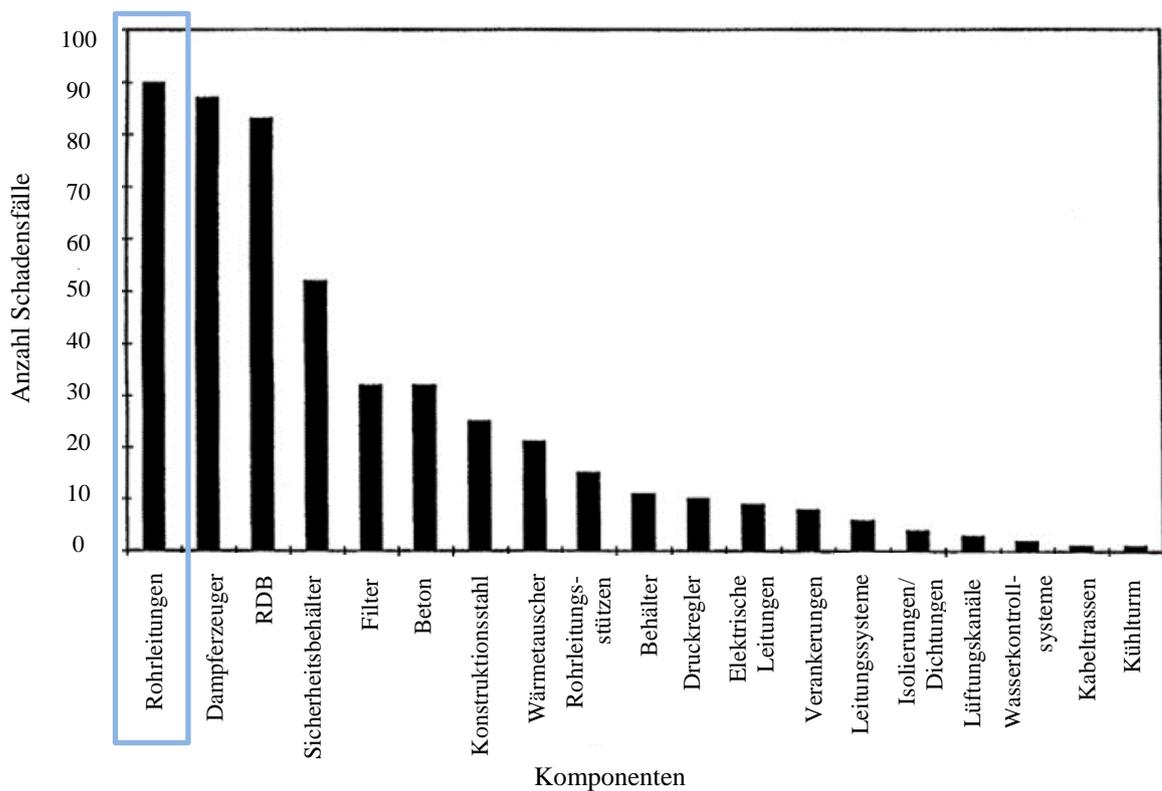


Abbildung 2.10: Alterungsbedingte Schadenshäufigkeit verschiedener Komponenten (DWR und SWR), nach [8, S. 266]

In Tabelle 2.1 werden Ursachen für alterungsbedingte Schadensfälle am Beispiel von Rohrleitungen im RDB benannt. Zu den vorherrschenden Schadensmechanismen während des Betriebs eines Kernkraftwerkes gehören demnach Rissentstehung und -wachstum infolge von Korrosionsbildung⁸, speziell durch Spannungsrissskorrosion und dehnungsinduzierte Risskorrosion.

⁸ *Roos et al.* [154, S. 369] definiert Korrosion, als „die unerwünschte, von der Oberfläche ausgehende chemische, physikalisch-chemische oder elektrochemische Reaktion eines Werkstoffes mit einem umgebenden Medium, die mit einem Schädigungsprozess ausgehend von der Oberfläche verbunden ist. Die Korrosion ist somit i. Allg. eine Grenzflächenreaktion.“

Tabelle 2.1: Alterungsbedingte Schadensfälle bei druckführenden Komponenten, nach [8, S. 287]

Komponenten (Beispiele)	Komponentenzustand aus Herstellung	Schädigungsmechanis- men im Betrieb	Schädigungsmechanis- men im Betrieb
RDB Rohrleitungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Werkstoffzustand ▪ Chem. Zusammensetzung ▪ Festigkeit ▪ Wärmebehandlung ▪ Verformung ▪ Eigenspannungen ▪ Relaxationsrisse ▪ Kerbe, Spalten ▪ Nahtaufbau 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Korrosionsrissbildung ▪ Spannungsrisskorrosion ▪ Dehnungsinduzierte Risskorrosion ▪ Korrosiver Werkstoffabtrag ▪ Spaltkorrosion 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Medium ▪ Sauerstoff ▪ Leitfähigkeit ▪ Chlorid, Sulfat ▪ Strömungsverhältnisse ▪ Beanspruchung ▪ Temperatur ▪ Bestrahlung

So konnten beispielsweise auch bei einer Revision von Block II des GKN im Jahr 2022 Korrosionsschäden an Rohrleitungssystemen festgestellt werden. Insgesamt wurden 16.400 Rohre überprüft, wobei an 35 Heizrohren lineare Wanddickenschwächungen identifiziert wurden. Es handelt sich hierbei um in Umfangsrichtung orientierte rissartige Wanddickenschwächungen. Hintergrund für die am 04. Juni 2022 begonnene Revision waren erstmals im Jahr 2018 festgestellte lineare Schwächungen der Wanddicke. Diese gingen laut des Umweltministeriums von der Rohraußenseite aus, wobei als Ursache eine Spannungsrisskorrosion identifiziert wurde. [39]

Nach *Laufs* [8, S. 289] können durch ein Alterungsmanagement unzulässige Komponentenzustände in kerntechnischen Anlagen verhindert und die Auswirkungen von Schadensmechanismen dadurch kontrolliert werden.

Das Aufzeigen von Schadensmechanismen während der Laufzeit eines Kernkraftwerkes hebt die Bedeutung eines Rohrinrentrennsystems auch während dem Betrieb einer Anlage hervor und verdeutlicht, dass nicht nur während des Rückbaus ein universelles Rohrinrentrennsystem von Bedeutung ist.

2.3.4 Ausführungen von Rohrleitungen in Kernkraftwerken

Die Anforderungen an Rohrleitungssysteme in kerntechnischen Anlagen ergeben sich einerseits aus der Grundkonzeption eines Kernkraftwerkes und der vorhandenen Radioaktivität, andererseits aus den sich hieraus ableitenden Maßnahmen zur Sicherheit des Bedienpersonals und der Umwelt [33, S. 205]. Infolge des Transports von flüssigen und gasförmigen Medien, teilweise unter hohem Druck und hohen Temperaturen, haben Rohrleitungen eine wesentliche sicherheitstechnische Bedeutung. Ferner werden in Rohrleitungen u.a. radioaktive Medien transportiert, weshalb die Integrität nicht nur im Betrieb, sondern auch bei Störfällen, wie z.B. Erdbeben, notwendig ist. [40, S. 23]

Die Qualität der zu verwendeten Stahlerzeugnisse in kerntechnischen Anlagen, beispielsweise Bleche, Rohrleitungen, Gussstücke etc., ist durch zerstörungsfreie Prüfungen zu gewährleisten. So sind beispielsweise innere Fehler unzulässig, da Risse und Kerben die Festigkeit der Komponenten reduzieren und durch Vertiefungen bzw. Riefen die Ablagerung von radioaktiven

Stoffen begünstigt wird. Grundsätzlich dürfen die Oberflächen keine ferritischen Bestandteile und andere Verunreinigungen aufweisen, weil hierdurch die Entstehung von Korrosion gefördert wird. [33, S. 214]

Informationen bezüglich der eingebauten Rohrleitungen in nuklearen Anlagen sind dem Regelwerk des Kerntechnischen Ausschusses (KTA), bei welchem es sich um ein untergesetzliches Regelwerk handelt, zu entnehmen. Dem KTA obliegt die Aufgabe, „auf Gebieten der Kerntechnik, bei denen sich auf Grund von Erfahrungen eine einheitliche Meinung von Fachleuten der Hersteller, Ersteller und Betreiber von Atomanlagen, der Gutachter und der Behörden abzeichnet, für die Aufstellung sicherheitstechnischer Regeln zu sorgen und deren Anwendung zu fördern.“ [41]

Die kennzeichnende Größe zur Beschreibung einer Rohrleitung ist die Nennweite (DN; engl. Diameter Nominal). Nach dem Deutschen Institut für Normung (DIN) und der Europäischen Norm (EN) der Internationalen Organisation für Normung (ISO) *DIN EN ISO 6708* [42, S. 2], wird die DN als „alphanumerische Bezeichnung der Größe für Bauteile in einem Rohrleitungssystem, die für Referenzzwecke verwendet wird,“ definiert. Die dimensionslose, ganze Zahl hinter der Abkürzung DN entspricht in ihrem Zahlenwert annähernd dem Innendurchmesser der Rohrleitung in Millimetern. Sofern in der geltenden Norm nicht darauf verwiesen wird, ist diese Zahl nicht für Berechnungen zu verwenden, da sie keinem messbaren Wert entspricht. Die wesentlichen Größen zur Beschreibung einer Rohrleitung zeigt Abbildung 2.11. Neben der Nennweite sind der Außendurchmesser d_A und der Innendurchmesser d_i sowie die Wandstärke w relevant.

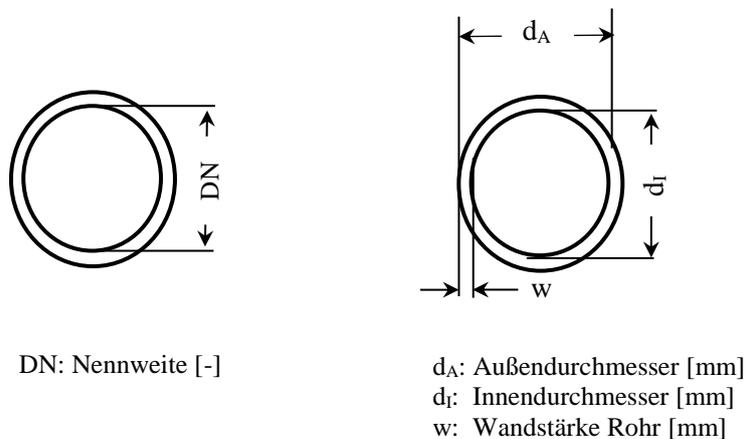


Abbildung 2.11: Kenngrößen zur Beschreibung einer Rohrleitung, nach [43], [44]

Eine Zusammenstellung der **zugelassenen Werkstoffe** für Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen ist Tabelle 2.2 zu entnehmen. Zusätzlich enthält die Tabelle Angaben zur Erzeugnisform und benennt stichpunktartig den Einsatzbereich der aufgeführten Rohre. Teilweise umfassen die Angaben auch detailliertere Informationen zur Nennweite und Wandstärke. Die Inhalte basieren auf einer Literaturrecherche in den genannten KTA-Regeln. Das Regelwerk beinhaltet aktuell 97 Regelvorhaben [41].

Ausgehend von der Eingrenzung der Arbeit auf Rohrleitungen aus Stahl, wird in Tabelle 2.2 u.a. nicht auf Rohrleitungen aus Kunststoff eingegangen. Die Tabelle bildet die Grundlage für die Auswahl und den Aufbau der Prüfkörper. In blau hinterlegte Werkstoffe werden in den experimentellen Versuchsreihen untersucht.

Tabelle 2.2: Zugelassene Werkstoffe für Rohrleitungen in Kernkraftwerken gemäß KTA-Regelwerk

Erzeugnisform	Zugelassene Werkstoffe [Werkstoffnummer/Kurzname]	Einsatzbereich
KTA 2502: Mechanische Auslegung von <u>Brennelementlagerbecken in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren</u> , nach [45, S. 9]		
Nahtlose oder geschweißte Rohre p ≤ 0,5 bar, p x DN ≤ 1.000 oder ≤ DN 32	Austenitische Stähle: 1.4541 [X6CrNiTi18-10] 1.4550 [X6CrNiNb18-10] 1.4571 [X6CrNiMoTi17-12-2]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rohrdurchführungen der Kühl- und Reinigungskreisläufe und sonstige Rohrdurchführungen ▪ Stahlbaukonstruktionen innerhalb der Becken, z.B. Gestelle, Stützen ▪ Konstruktionen innerhalb der Becken, z.B. Rieselleitungen, Umlenkhauben ▪ Leckagerrohrleitungen
KTA 3201.1: <u>Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren</u> - Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen, nach [46, S. 43,48, 61, 86, 91-92,107]		
Nahtlose, gewalzte, gepresste oder geschmiedete Rohre mit 15 - 20 mm Vergütungs wandstärke	1.6310 [20MnMoNi5-5]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Komponenten von Leichtwasserreaktoren
Nahtlose warm- oder kaltgefertigte, wärmebehandelte Rohre aus nichtrostenden austenitischen Stählen bis 50 mm Wandstärke	Austenitische Stähle: 1.4541 [X6CrNiTi18-10] 1.4550 [X6CrNiNb18-10] 1.4571 [X6CrNiMoTi17-12-2]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Komponenten von Leichtwasserreaktoren
KTA 3204: <u>Reaktordruckbehälter-Einbauten</u> , nach [47, S. 45,95]		
Nahtlose und geschweißte Rohre	Austenitische Stähle: 1.4306 [X2CrNi19-11] 1.4541 [X6CrNiTi18-10] 1.4550 [X6CrNiNb18-10] 1.4571 [X6CrNiMoTi17-12-2] 1.4580 ^a [X6CrNiMoNb17-12-2]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reaktordruckbehälter-Einbauten

KTA 3205.1: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen – Teil 1: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen <u>für Primärkreis Komponenten</u> in Leichtwasserreaktoren, nach [48, S. 21] + KTA 3205.2: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen- Teil 2: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen für druck- und aktivitätsführende Komponenten in Systemen <u>außerhalb des Primärkreises</u> , nach [49, S. 22]		
Nahtlose und geschweißte Rohre	Austenitische Stähle: 1.4301 [X5CrNi18-10] 1.4541 [X6CrNiTi18-10] 1.4550 [X6CrNiNb18-10] 1.4571 [X6CrNiMoTi17-12-2]	
	1.0254 [P235TR1] 1.0345 [P235GH] 1.0565 [P355NH]	
	Unlegierte Baustähle: 1.0039 [S235JRH] 1.0138 [S275J2H] 1.0576 [S355J2H]	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stahlbühnen ▪ Rohrleitungshalterungen ▪ Komponentenabstützung ▪ Schutz- und Sonderkonstruktionen etc. 		
KTA 3211.1: Druck- und aktivitätsführende Rohrleitungen <u>außerhalb des Primärkreislaufes</u> – Teil 1: Werkstoffe, nach [50, S. 9,25,82]		
Nahtlose, gewalzte oder gepresste Rohre > DN 50 ^b	1.6210 [15MnN 6-3] 1.6310 [20MnMoNi5-5] 1.6369 [15NiCuMoNb5 S]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Druck- und aktivitätsführende Rohrleitungen außerhalb des Primärkreislaufes
Nahtlose, gewalzte oder gepresste Rohre > DN 50 ^b	1.6210 [15 MnNi6-3] 1.0345 [P235GH] 1.0488 [P275NL1] 1.0565 [P355NH] 1.5415 [16Mo3]	

^a: nur für nahtlose Rohre

^b: gelten auch für Rohre gleich oder kleiner als DN 50, wenn aus solchen Rohren Rohrbogen größer als DN 50 hergestellt werden

Bei den ausgewählten Werkstoffen handelt es sich um einen austenitischen Stahl⁹ und einen unlegierten warmfesten Baustahl. Mit diesen Werkstoffen wird ein großes Anwendungsspektrum in kerntechnischen Anlagen abgedeckt. Als Beispiele sind Rohrleitungen im Brennelementlagerbecken und im RDB sowie nichtintegrale Anschlüsse in Form von Rohrleitungssystemen innerhalb und außerhalb des Primärkreislaufes zu nennen. Unter Rohrleitungen außerhalb des Primärkreislaufes sind nach *Wosso* [33, S. 211-212] Systeme zu verstehen, welche eine reakt-

⁹ Die austenitischen Stähle stellen die bedeutendste Gruppe der nichtrostenden Stähle dar [111]. Austenit ist der wichtigste Gefügebestandteil austenitischer Legierungen. Während die austenitische Phase eine kubisch-flächenzentrierte Struktur hat, weist ferritischer Stahl eine kubisch-raumzentrierte Kristallstruktur auf. [148, S. 25]

torsicherheitstechnische Bedeutung haben oder durch deren Versagen erhebliche anlageninterne Schäden verursacht werden können. Beispiele für äußere Systeme sind u.a. Frischdampfleitungen und Speisewasserdruckleitungen sowie das Abkühl-, Notkühl- und Zuspiseseystem.

Ergänzend zu den Angaben in den Regelwerken des KTAs wurden im Rahmen des Projektes „RoTre“ Daten von der Firma Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH und der RWE GmbH hinsichtlich der Rohrleitungswandstärken übermittelt. Durch diese ist eine Abschätzung der verbauten Wandstärken und Durchmessern möglich.

Für eine möglichst universelle Einsetzbarkeit eines Rohrintrennsystems müssen sowohl Werkstücke mit und ohne Schweißnaht untersucht werden. Die vorangehende Tabelle zeigt, dass bei der Erzeugnisform zwischen nahtlosen und geschweißten bzw. gewalzten oder gepressten Rohren zu unterscheiden ist. **Rohrleitungen mit Längsschweißnaht**¹⁰ können z.B. durch das Fretz-Moon-Verfahren hergestellt werden. Bei diesem Verfahren wird ein endloses erwärmtes Stahlband durch eine Presse oder Dreiwalzenbiegemaschinen zum Schlitzrohr geformt und die Kanten pressverschweißt [51]. Der beschriebene Prozess ist in Abbildung 2.12 grafisch dargestellt.

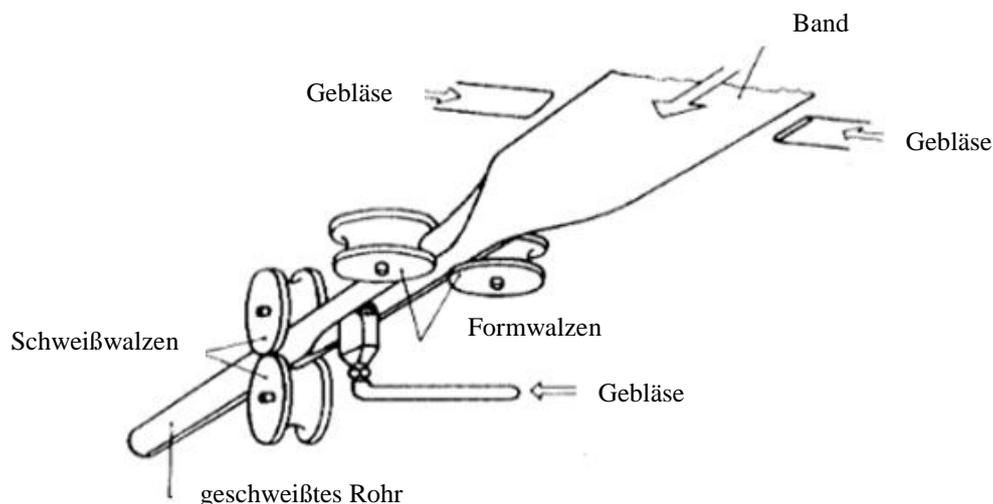


Abbildung 2.12: Fretz-Moon-Schweißwalzwerk von unten gesehen, nach [52, S. 36]

Nahtlose Rohre können u.a. durch das Schrägwalz-Pilgerschrittverfahren, zu vergleichen in Abbildung 2.13, erzeugt werden. Hierbei wird ein massiver runder Stahlblock, die sogenannte Bramme, auf 1.250 - 1.300 °C erhitzt und zwischen zwei schräg zueinander angeordneten Arbeitswalzen mit gleichem Drehsinn geführt. Über den Lochdorn, der sich zwischen den Walzen befindet, wird ein nahtloses Rohr geformt. [53], [54]

¹⁰ Geschweißte Rohre können entweder mit einer Längs- oder Spiralschweißnaht hergestellt werden [53]. Die Rohrleitungen in der vorliegenden Arbeit sind längsgeschweißt.

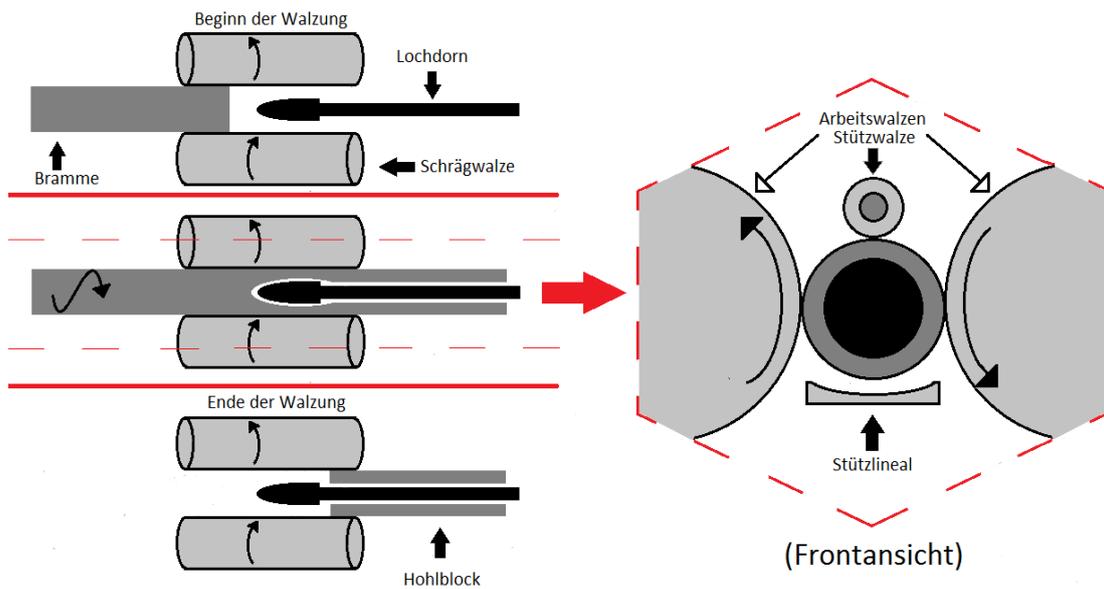


Abbildung 2.13: Schrägwalz-Pilgerschrittverfahren [53]

Ein Vorteil nahtloser Rohre gegenüber geschweißten Rohren ist eine idealere Rundheit. Dahingegen sind Rohre mit Schweißnaht i.d.R. kostengünstiger und leichter verfügbar. Vor allem der letzte Punkt, in Kombination mit einer größeren Auswahl an vorhandenen Durchmessern und Wandstärken geschweißter Rohre, hat die Auswahl der Werkstücke für die experimentellen Versuchsreihen beeinflusst. Die Auswahl der Werkstoffe wird detailliert in Abschnitt 4.3 im Rahmen der Beschreibung der ausgewählten Werkstücke für die experimentellen Versuchsreihen thematisiert. Hierin werden auch die Kurznamen der Werkstoffe aus Tabelle 2.2 näher beschrieben.

3 Stand der Technik Rohrtrennung

Die Rohrtrennung ist im Allgemeinen in Rohraußen- und Rohrinrentrennung zu untergliedern. Wie sich aus den Namen bereits ableiten lässt, ist bei der Rohraußentrennung ausreichend Platz um das zu trennende Rohr vorhanden und die Rohrleitung kann von der Rohraußenseite mit herkömmlichen Techniken bzw. Geräten getrennt werden. Eine Rohrinrentrennung, d.h. die Trennung von der Rohrinenseite, ist u.a. bei beschränkten Zugänglichkeiten oder bei Rohrleitungen, die in Beton verlegt sind, notwendig. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den spanenden Fertigungsverfahren Fräsen, Sägen und Schleifen. Daher umfasst der Abschnitt Stand der Technik nur Verfahren, die sich diesen Fertigungsverfahren zuordnen lassen.

Zu Beginn des Kapitels folgt eine Einführung in die Fertigungsverfahren einschließlich einer Abgrenzung der zu untersuchenden Verfahren. In diesem Kapitel wird lediglich die Einordnung der Fertigungsverfahren beschrieben. Im Rahmen der in Absatz 4.2 dargestellten Werkzeugauswahl für die experimentellen Versuchsreihen, wird detailliert auf mögliche Schneidstoffe bzw. Schleifmittel sowie auf den Aufbau und mögliche Ausführungsarten der Trennwerkzeuge eingegangen. Im Anschluss an die Fertigungsverfahren, werden auf dem Markt verfügbare Geräte zur Rohrtrennung vorgestellt. Abschluss von Kapitel 3 bilden die sich aus dem Stand der Technik abgeleiteten Forschungsfragen zur Entwicklung eines neuartigen Rohrinrentrennsystems.

3.1 Einführung und Abgrenzung Fertigungsverfahren

Unter Fertigungsverfahren sind laut *DIN 8580* [55, S. 4] „alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern; sie schließen die Verfahren zur Gewinnung erster Formen aus dem formlosen Zustand, zur Veränderung dieser Form sowie zur Veränderung der Stoffeigenschaften ein,“ zu verstehen. Gemäß *DIN 8580*, werden die Fertigungsverfahren nach ihren Merkmalen in insgesamt sechs Hauptgruppen, zu vergleichen in Tabelle 3.1, eingeteilt.

Tabelle 3.1: Merkmale der Fertigungsverfahren und Einteilung in Hauptgruppen, nach [55, S. 7]

Schaffen der Form	Ändern der Form				Ändern der Stoffeigenschaften
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		-
Hauptgruppe 1 Umformen	Hauptgruppe 2 Umformen	Hauptgruppe 3 Trennen	Hauptgruppe 4 Fügen	Hauptgruppe 5 Beschichten	Hauptgruppe 6 Stoffeigenschaft ändern

Die Arbeiten dieser Dissertation sind der Hauptgruppe 3 „Trennen“ zuzuordnen. Der Begriff Trennen bezeichnet das „Fertigen durch Aufheben des Zusammenhaltens von Körpern, wobei der Zusammenhalt teilweise oder im Ganzen vermindert wird [55, S. 4].“ Die weitere Unter-

gliederung der dritten Hauptgruppe in Gruppen und Untergruppen ist in Abbildung 3.1 zu sehen.

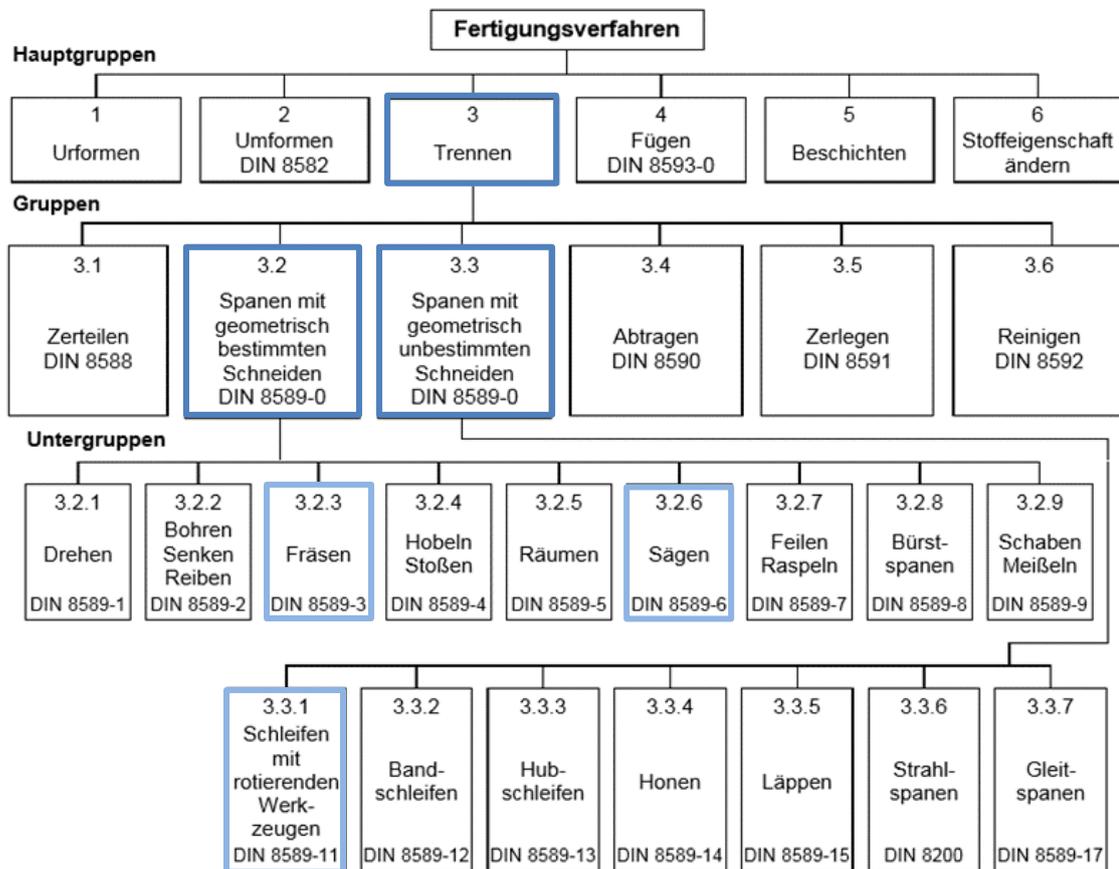


Abbildung 3.1: Übersicht Einteilung der Hauptgruppe 3 „Trennen“ [56, S. 8]

Die experimentellen Versuchsreihen zur Rohrintrennung im Rahmen dieser Arbeit beschränken sich auf die Gruppe 3.2 „Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden“ und die Gruppe 3.3 „Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden“. In der *DIN 8589-0* „Fertigungsverfahren Spanen“ [56, S. 4] wird Spanen als das „Trennen, bei dem durch die Schneiden eines Werkzeuges von einem Werkstück Werkstoffschichten in Form von Spänen auf mechanischen Wege abgetrennt werden“, definiert.

Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden umfasst Fertigungsverfahren, bei welchen sowohl die Schneidenanzahl, die Geometrie der Schneidkeile und die Lage der Schneiden des verwendeten Werkzeuges zum Werkstück bestimmt sind [55, S. 4]. Dies trifft u.a. auf die zu untersuchenden Verfahren Fräsen und Sägen zu. Nachfolgend werden die beiden Fertigungsverfahren, entsprechend den geltenden Normen, definiert.

Unter **Fräsen** ist in Anlehnung an *DIN 8589-3* [57, S. 3] das „Spanen mit kreisförmiger, einem meist mehrzahnigen Werkzeug zugeordneter Schnittbewegung und mit senkrecht oder auch schräg zur Drehachse des Werkzeuges verlaufender Vorschubbewegung zur Erzeugung beliebiger Werkstückoberflächen“ zu verstehen. **Sägen** hingegen bezeichnet gemäß *DIN 8589-6* [58, S. 3] das Spanen mit „kreisförmiger oder gerader Schnittbewegung, mit einem vielzahnigen

Werkzeug von geringer Schnittbreite, wobei die Schnittbewegung vom Werkzeug ausgeführt wird.“

Fertigungsverfahren, deren Schneidenanzahl, Geometrie der Schneidkeile und Lage der Schneiden des verwendeten Werkzeuges zum Werkstück unbestimmt sind, fallen in die Gruppe **Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden** [56, S. 4]. In der vorliegenden Arbeit gilt das für das Verfahren **Schleifen mit rotierendem Werkzeug (kurz: Schleifen)**. Nach *DIN 8589-11* [59, S. 3] handelt es sich hierbei um ein „spanendes Fertigungsverfahren mit vielschneidigen Werkzeugen, deren geometrisch unbestimmte Schneiden von einer Vielzahl gebundener Schleifkörper aus natürlichen oder synthetischen Schleifmitteln gebildet werden und mit hoher Geschwindigkeit [...] den Werkstoff abtrennen.“

3.2 Rohraußentrennung

Eine Übersicht der auf dem Markt verfügbaren Geräte zur Rohraußentrennung, untergliedert in Spanen mit geometrisch bestimmten bzw. unbestimmten Schneiden, ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Auch wenn sich die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit auf die Rohrintrennung konzentrieren, werden Geräte zur Rohraußentrennung aufgeführt. Hierdurch soll aufgezeigt werden, dass sich diese in der Wirkungsweise von der geplanten Rohrintrennung unterscheiden und daher ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen zur Rohrintrennung notwendig sind. Wie Abbildung 3.2 zu entnehmen ist, umfassen die spanenden Techniken zur Rohraußentrennung diverse Rohrsägen und Winkelschleifer. Die aufgeführten Maschinen werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

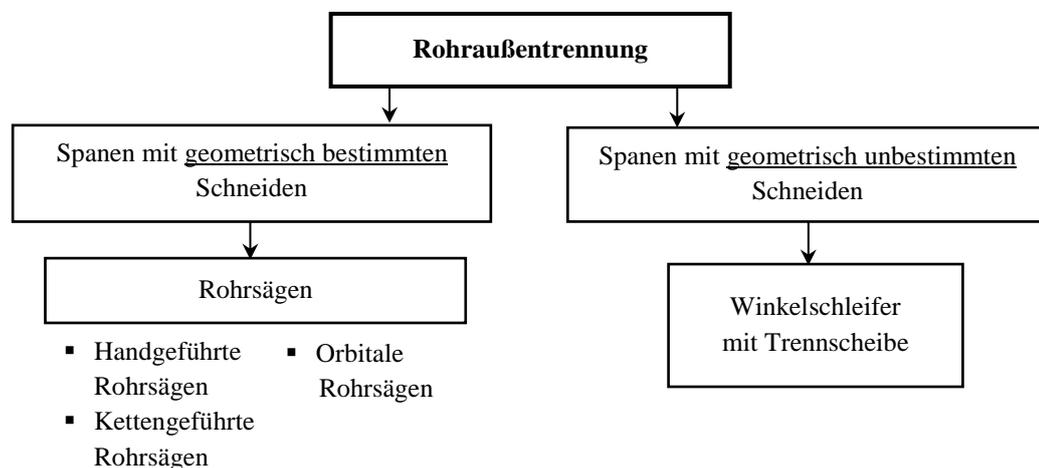


Abbildung 3.2: Untergliederung auf dem Markt verfügbare Geräte zur Rohraußentrennung

3.2.1 Hand- und kettengeführte Rohrsägen

Je nach Material und Außendurchmesser der zu trennenden Rohrleitung gibt es verschiedene Ausführungen von **handgeführten Rohrsägen** für Stahl-, Edelstahl-, Guss-, Kunststoff- und Aluminiumrohre mit variierenden Spannweiten. Die Firma DWT GmbH [60] bietet z.B. für die Trennung von Edelstahlrohren acht Rohrsägen an, mit welchen Außendurchmesser von

15 - 460 mm und Wandstärken von 8 - 20 mm getrennt werden können. Teilweise besitzen die Rohrsägen einen integrierten Laser zur Schnittüberwachung und können mit Druckluft betrieben werden, wodurch eine flexiblere Anwendung ermöglicht wird.

Die in Abbildung 3.3 dargestellte Rohrtrennmaschine „Exact Inox 220“ mit integriertem Laser kann beispielsweise für Edelstahlrohre von 20 - 220 mm Außendurchmesser und eine max. Wandstärke von 12,5 mm eingesetzt werden [61]. Zur Rohraußentrennung von Stahlrohren stehen weitere Rohrsägen zur Verfügung, wie z.B. die Rohrsäge „Exact Pro Series 360“ für Außendurchmesser von 70 - 360 mm und einer max. Wandstärke von 20 mm [62].



Abbildung 3.3: v.l.n.r.: Rohrtrennmaschine „Exact Inox 220“ [61], Rohraußentrennung Edelstahlrohr [61], Rohrtrennmaschine „Exact Pro Series 360“ [63], Rohraußentrennung Stahlrohrpfahl [62]

Im Gegensatz zu handgeführten Rohrtrennmaschinen, werden **kettengeführte Rohrsägen** mit einem kettenartigen Spannmeechanismus, zu vergleichen in Abbildung 3.4, an der Rohraußenseite fixiert. Die beispielhaft ausgewählte kettengeführte Rohrtrennmaschine „Exact Infinity“ der Firma DWT GmbH [64] ist für alle Rohrmaterialien und in Abhängigkeit des Materials für eine max. Wandstärke von 20 mm (Eisen, Stahl) bzw. max. 50 mm (Kunststoff) geeignet. Die Kettensegmente ermöglichen eine Trennung von Rohrleitungen mit Außendurchmessern von 460 mm - 3.000 mm.



Abbildung 3.4: Kettengeführte Rohrtrennmaschine „Exact Infinity“ [64]

Durch die exemplarisch ausgewählten hand- und kettengeführten Rohrsägen wird ersichtlich, dass die Maschinen für den konventionellen Bereich entwickelt wurden und je nach Material, Wandstärke und Durchmesser eine spezielle Rohrtrennmaschine ausgewählt werden muss. Kettengeführte Rohrsägen sind deutlich flexibler in der Anwendung, allerdings ist eine Rohrauß-

Bentrennung mit dem abgebildeten Modell „Exact Infinity“ erst ab einem Außendurchmesser von 460 mm möglich. Auch bei freiliegenden Rohren in kerntechnischen Anlagen könnten diese Rohrsägen aufgrund beengter Zugänglichkeiten nicht immer angewendet werden. Hinzu kommt, dass die Rohrsägen u.a. keine Fernhantierungsmöglichkeiten aufweisen.

3.2.2 Orbitale Rohrsägen

Bei orbitalen Rohrsägen wird das zu trennende Rohr mittels Spannbacken zentriert und durch ein Sägeblatt, welches um das Rohr gedreht wird, getrennt. Wie bei handgeführten Rohrsägen, existieren in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers verschiedene orbitale Rohrsägen. Die Rohrsäge „CC172“ des Herstellers AXXAIR [65] in Abbildung 3.5 kann z.B. für Rohrdurchmesser von 16 - 173 mm und für Wandstärken größer 3 mm angewendet werden.



Abbildung 3.5: Orbitale Rohrsäge „CC172“ [65]

Orbitale Rohrsägen eignen sich vorwiegend für das Schneiden bzw. Zerkleinern von Rohren. Es handelt sich daher um keine effiziente Methode für den Rückbau von Rohrleitungen. Durch das Orbitalsägen wird vielmehr verdeutlicht, dass die vorhandenen Techniken auf dem Markt für den Rückbau gewisse Defizite aufweisen, das Trennen mit Sägeblättern aber durchaus in der Praxis angewandt wird. [66, S. 27-28]

Neben orbitalen Rohrsägen existieren u.a. noch orbitale Rohrdrehmaschinen, deren Trennvorgang beispielsweise durch Trennmeißel erfolgt. Da die Untergruppe „Drehen“ nach DIN 8589-1, zu vergleichen in Abbildung 3.1, nicht Teil der ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit ist, wird diese Technik nicht weiter vertieft.

3.2.3 Winkelschleifer

Winkelschleifer können durch unterschiedliche Aufsätze, wie beispielsweise Trenn- und Schleifscheiben, neben dem Trennen und Schneiden von Materialien auch für das Schleifen von Wänden oder Metallteilen sowie für das Entfernen von Rost verwendet werden. Über einen Elektromotor wird eine rotierende Trenn- oder Schleifscheibe angetrieben und je nach Aufsatz Material abgeschliffen oder getrennt. Im Gegensatz zu anderen Werkzeugen sind die Umdrehungsdrehzahlen von Trenn- und Schleifscheiben deutlich höher. [67], [68]

Für die vorliegende Arbeit ist lediglich das Trennen von Materialien und die damit verbundene Verwendung von Trennscheiben relevant. Der Aufbau einer Trennscheibe und die Merkmale verschiedener Schleifmittel werden in Absatz 4.2.2 in Zusammenhang mit der Auswahl der in den experimentellen Versuchsreihen zu analysierenden Trennscheiben behandelt. Abbildung 3.6 zeigt links beispielhaft das Trennen eines Stahlrohrs mit einem Winkelschleifer und Trennscheibe.



Abbildung 3.6: links: Rohraußentrennung mit Winkelschleifer [69]; rechts: Anwendung Winkelschleifer im KGR [70, S. 51]

Durch den Einsatz eines Winkelschleifers zur Demontage einer Rohrleitung im Kernkraftwerk Greifswald (KGR), in Abbildung 3.6 rechts zu sehen, kann belegt werden, dass diese Technik auch in kerntechnischen Anlagen verwendet wird und der entstehende Funkenflug in Kernkraftanlagen unproblematisch ist. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist wegen dem zu erwartenden Funkenflug, aber auch wegen der Lärm- und Staubentwicklung, entsprechende persönliche Schutzausrüstung zu tragen [68].

3.3 Rohrintrennung

Entwicklungen im Bereich der Rohrintrennung sind auf Verfahren mit geometrisch bestimmten Verfahren, speziell auf Sägeblätter, beschränkt.

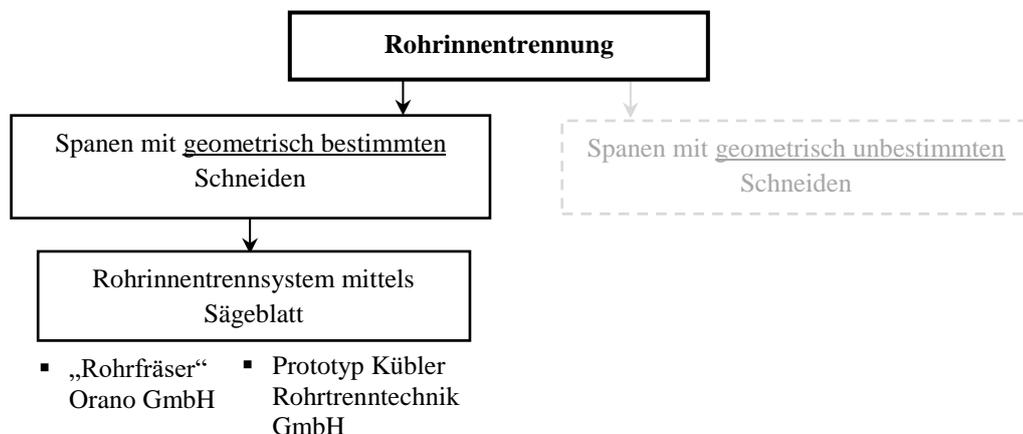


Abbildung 3.7: Untergliederung Rohrintrennsysteme

In Anlehnung an Abbildung 3.7, existiert u.a. ein Rohrintrennsystem der Orano GmbH, welches speziell für den nuklearen Rückbau entwickelt wurde sowie ein Prototyp der Kübler Rohrtrenntechnik GmbH. Eine Beschreibung beider Systeme wird in den nächsten beiden Absätzen gegeben.

3.3.1 Rohrfräser Orano GmbH

Der in Abbildung 3.8 dargestellte Rohrfräser der Orano GmbH kann unter Wasser Rohrleitungen aus austenitischem Edelstahl mit einem Außendurchmesser von 252 - 268 mm und Wandstärken von 8,0 - 8,5 mm trennen. Die Rohrintrennung wird mit einem Sägeblatt durchgeführt, auch wenn sich irreführend der Name „Rohrfräser“ etabliert hat. Das System wurde konkret für Rohrstrukturen am oberen Kerngerüst von Druckwasserreaktoren entwickelt, wobei die Bearbeitungseinheit des Rohrfräasers verlängert werden kann und Schnitte auf unterschiedlichen Höhen realisiert werden können. Der Schnitt durch einen RDB in Abbildung 3.8 rechts zeigt die Einbaulage der Rohrstrukturen im oberen Kerngerüst. Je nach Konfiguration beträgt das Gesamtgewicht des Rohrintrennsystems ca. 280 - 340 kg. [71]

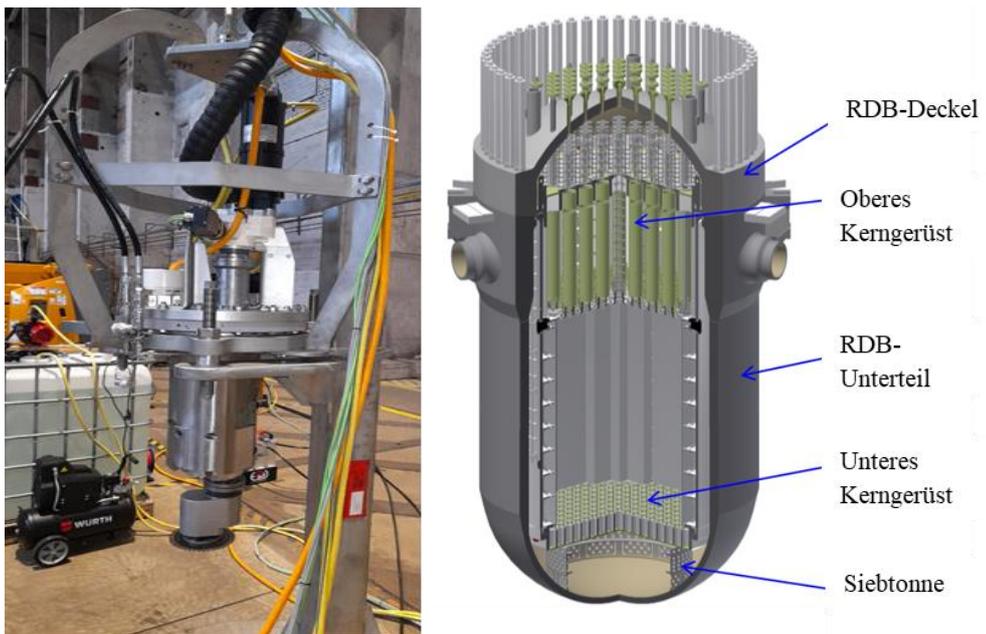


Abbildung 3.8: links: Prototyp Orano GmbH [71]; rechts: Schnitt durch einen RDB, nach [72, S. 20]

Anhand Abbildung 3.8 links wird ersichtlich, dass um die zu trennenden Rohrleitungen ausreichend Platz vorhanden sein muss und der Aufbau nicht für horizontal, sondern für senkrecht verlegte Rohrleitungen konzipiert wurde. Der Rohrfräser unterscheidet sich damit nicht nur vom Anwendungsfall der geplanten Rohrintrennvorrichtung in der vorliegenden Arbeit, sondern weist mit einem Einsatz unter Wasser und einem Durchmesserbereich, der auf 252 - 268 mm begrenzt ist, andere Randbedingungen auf. Zudem ist das System bei einem Gesamtgewicht von 280 - 340 kg nicht mobil und flexibel einsetzbar.

Neben der Orano GmbH hat die TRAWEMA GmbH ein Rohrintrennsystem für das Trennen von Steuerstab-Führungsrohren im Reaktordruckgefäß entwickelt. Der Trennvorgang erfolgt jedoch von der Rohrintnenseite durch ein drehendes Verfahren mittels Stechschwertern [73]. Die Entwicklungsarbeit und die wissenschaftlichen Untersuchungen überschneiden sich daher nicht mit denen in der vorliegenden Arbeit.

3.3.2 Prototyp Kübler Rohrtrenntechnik GmbH

Bei dem Rohrintrenner der Kübler Rohrtrenntechnik GmbH handelt es sich um einen Prototyp, der durch einen hydraulischen Antrieb und ein Sägeblatt das Rohr von der Innenseite trennt. Der Rohrintrenner kann im Durchmesserbereich von 100 - 600 mm und bis zu einer max. Wandstärke von 15 mm für Stahl- und Gussrohre eingesetzt werden. Die Maschine wurde lediglich für einen speziellen Anwendungsfall entwickelt und ist nicht auf dem Markt erhältlich. [66, S. 44-45] In Abbildung 3.9 ist der Prototyp in einer schwer zugänglichen Rohrleitung in einem Stollen zu sehen. Für diese Anwendung wurde der Rohrintrenner konkret entwickelt.



Abbildung 3.9: Rohrintrennung einer schwer zugänglichen Rohrleitung in einem Stollen mittels Prototyp Kübler Rohrtrenntechnik GmbH [74]

3.4 Schlussfolgerungen Stand der Technik

Zusammenfassend lässt sich durch das Aufzeigen der aktuell auf dem Markt verfügbaren Geräte zur Rohrtrennung einerseits festhalten, dass diese vorwiegend auf die Rohraußentrennung fokussiert sind und neben speziell entwickelten Rohraußentrennmaschinen u.a. auch handelsübliche Winkelschleifer eingesetzt werden. Andererseits wird gezeigt, dass die in der vorliegenden Arbeit ausgewählten Trennwerkzeuge für die Untersuchungen und Entwicklung einer universellen Rohrintrennvorrichtung sinnvoll sind, da Verfahren zur Rohrtrennung nach dem aktuellen Stand der Technik u.a. auf Sägeblätter und Trennscheiben basieren. Auf dem Markt verfügbar sind zudem außendrehende Rohrfräsmaschinen. Diese werden i.d.R. aber zum Anfasen verwendet und sind nicht für die Rohrtrennung konzipiert.

Die verfügbaren Prototypen zur Rohrintrennung verdeutlichen, dass auf diesem Gebiet Entwicklungsbedarf herrscht, um speziell in der Kerntechnik die Demontage von Rohrleitungen

zu vereinfachen. Bisherige Entwicklungen auf diesem Gebiet sind auf bestimmte konkrete Anwendungsfälle wie Rohrleitungen am oberen Kerngerüst oder auf Steuerstabs-Führungsrohre beschränkt. Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen hierzu wurden nicht veröffentlicht.

In Absatz 2.3.1 wurde gezeigt, dass für die Demontage von Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen häufig beengte Platzverhältnisse vorliegen oder Rohrleitungen beispielweise bei Gebäudeübergängen einbetoniert sind (vgl. Abbildung 2.7) und eine Rohraußentrennung in diesen Fällen nicht möglich ist.

Die vorliegende Dissertation setzt daher mit Untersuchungen zur Betriebsparameterwahl für die Entwicklung eines neuartigen Rohrintrennsystems an und leistet damit einen Beitrag zur Neuentwicklung von Verfahren und Technologien zur Demontage von Rohrleitungen.

3.5 Offene Fragestellungen und wissenschaftliches Programm

Ausgehend von den durchgeführten Recherchen zu verbauten Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen und der Analyse des Stands der Technik, ergeben sich verschiedene Fragestellungen, die zur Entwicklung einer Rohrintrennvorrichtung untersucht werden müssen. Diese lauten:

1. Welchen Einfluss haben unterschiedliche Rohrleitungen hinsichtlich Durchmesser und Material in nahtloser und geschweißter Ausführung in verschiedenen Einbaulagen (freiliegend, einbetoniert) auf die Rohrintrennung mittels spanender Trennwerkzeuge?
2. Mit welchem der drei untersuchten spanenden Trennwerkzeuge – Scheibenfräser, Kreissägeblätter und Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik, Korund und Diamant – kann ein kontinuierlicher Volumenabtrag und damit eine zur Rohrintrennung notwendige Schnittgüte, unter dem Gesichtspunkt der Verschleißoptimierung, erreicht werden?
3. Wie sind werkzeugabhängig die Betriebsparameter (Vorschub- und Umfangsgeschwindigkeit) für eine neuartige Rohrintrennvorrichtung zu wählen?

Zur Beantwortung der genannten Fragen, wurde ein Versuchsstand zur Rohrintrennung entwickelt, an welchem unterschiedliche Werkzeuge und Werkstücke bei Variation der Betriebsparameter getestet werden können. Eine ausführliche Systembeschreibung folgt im vierten Kapitel. Für Scheibenfräser und Kreissägeblätter wurde ausgehend von den durchgeführten experimentellen Versuchsreihen und den hieraus resultierenden Ergebnissen innerhalb des Projektes „RoTre“ von der Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH ein Prototyp zur Rohrintrennung entwickelt. Hierauf wird am Ende der Arbeit in Absatz 5.2.5.1 eingegangen.

4 Experimentelle Versuchsreihen

Im vorliegenden Kapitel wird zunächst eine Systembeschreibung gegeben. Anschließend werden die Steuer- und definierten Zielgrößen des beschriebenen Systems im Detail behandelt. Es werden neben allgemeinen Grundlagen zu Scheibenfräsern, Kreissägeblättern und Trennscheiben die in der Arbeit ausgewählten Werkzeuge aufgeführt. Des Weiteren werden die Werkstücke für die Versuchsreihen und die Funktion des entwickelten Versuchszustandes zur Rohrintrennung beschrieben. Damit zusammenhängend wird die Messtechnik und Methodik zu den in Abbildung 4.1 dargestellten Zielgrößen erläutert. Abschluss von Kapitel 4 bildet die Versuchsplanung und -durchführung.

4.1 Systembeschreibung

Für die experimentellen Versuchsreihen ist die Definition des Systems¹¹, einschließlich der Eingangsgrößen (gezielt veränderbare und nicht gezielt veränderbare Größen), der erzeugten Ergebnisse (erwünschte und unerwünschte Ergebnisse) sowie der Systemgrenzen unerlässlich. Von wesentlicher Bedeutung in diesem Zusammenhang ist das Parameterdiagramm (oder auch: P-Diagramm), durch welches die Systemverhältnisse beschrieben werden können [75, S. 147-148].

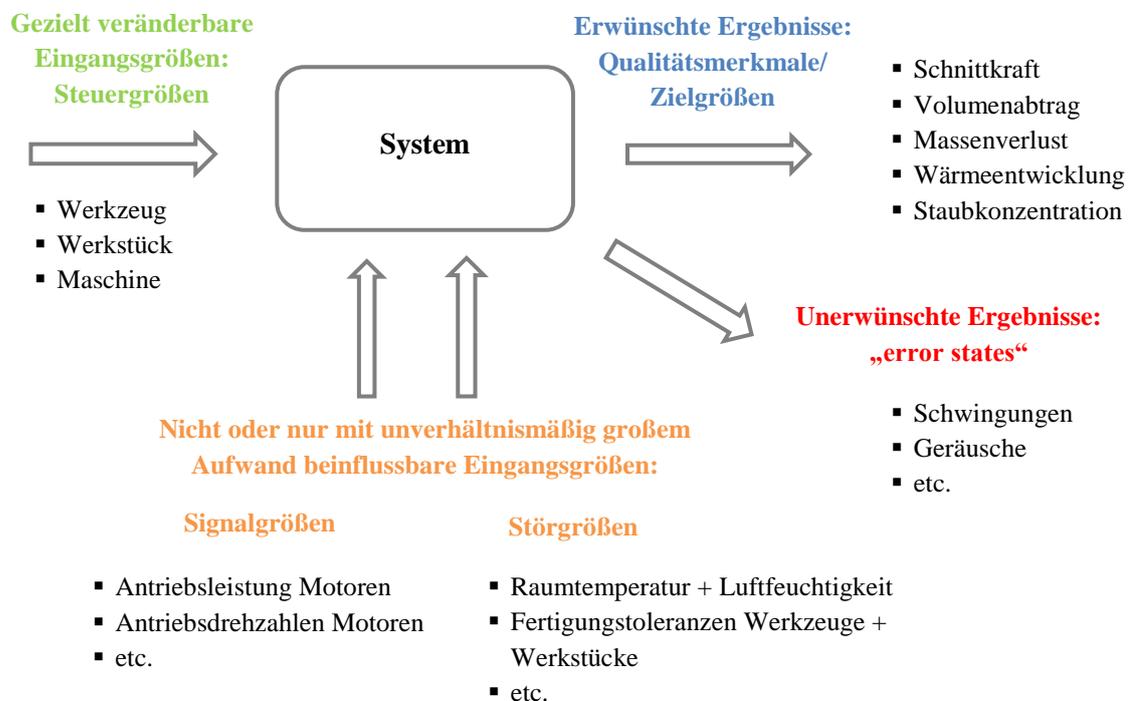


Abbildung 4.1: Parameterdiagramm, nach [9, S. 36], [75, S. 3, 148]

¹¹ Das System beschreibt nach *Siebertz et al.* [75, S. 3] das zu untersuchende Gebilde.

Abbildung 4.1 gibt ein an die vorliegende Arbeit abgestimmtes Parameterdiagramm in Form eines Blockschaltbildes wieder. Die im P-Diagramm aufgeführten Begriffe werden nun näher erläutert.

Die gezielt veränderbaren Eingangsgrößen heißen **Steuergrößen**. Sie liegen innerhalb der Systemgrenzen und sind beeinflussbar [75, S. 149]. In dieser Dissertation werden die Steuergrößen in die Parametergruppen Trennwerkzeug, Werkstück und Maschine untergliedert. Tabelle 4.1 fasst die Steuergrößen nach den genannten Parametern für die Versuchsreihen zur Rohrintrennung zusammen. Unter dem Begriff Parameter ist grundsätzlich die Menge aller Eingangsgrößen zu verstehen [75, S. 5]. Die Parametereinstellungen der Gruppe *Trennwerkzeug* beziehen sich auf die unterschiedlichen Scheibenfräser, Kreissägeblätter und Trennscheiben. Es werden, je nach Trennwerkzeug, u.a. der Schneidstoff und die Beschichtung bzw. bei Trennscheiben das Schleifmittel variiert. Die Gruppe *Werkstück* umfasst die verschiedenen Ausführungen der zu untersuchenden Rohrleitungen. Variiert werden die Werkstoffe und Rohraußendurchmesser der Rohrleitungen. Außerdem werden nahtlose und geschweißte sowie freiliegende und einbetonierte Rohrleitungen untersucht. Detaillierte Angaben zu den Werkstücken und Werkzeugen sind Absatz 4.2 bzw. 4.3 zu entnehmen. Die beeinflussbaren Konstruktionsparameter *Maschine* wie Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl beziehen sich auf den entwickelten Versuchsstand zur Rohrintrennung, welcher in Absatz 4.4. vorgestellt wird.

Tabelle 4.1: Steuergrößen nach Parametergruppen, nach [9, S. 37]

Parameter		
<u>Trennwerkzeug</u>	<u>Werkstück</u>	<u>Maschine</u>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Scheibenfräser ▪ Kreissägeblätter: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schneidstoff, ▪ Beschichtung ▪ Trennscheiben: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schleifmittel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Werkstoff ▪ Durchmesser ▪ Nahtlose und geschweißte Ausführung ▪ Freiliegende und einbetonierte Werkstücke 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorschubgeschwindigkeit ▪ Drehzahl

Wie anhand der Darstellung der Steuergrößen in Tabelle 4.1 ersichtlich wird, sind mit den Parametern eine Vielzahl an Faktoren für die experimentellen Versuchsreihen verbunden. Parameter, die im Versuchsplan enthalten sind, werden als Faktoren bezeichnet. Sie bilden eine ausgewählte Teilmenge ab [75, S. 5]. Zur Eingrenzung der Faktoren wird ein zweistufiges Vorgehen, untergliedert nach Vor- und Hauptversuche, verfolgt. Gemäß *Siebertz et al.* [75, S. 6] sind Vorversuche sinnvoll, um die Funktion des zu untersuchenden Systems und die geplanten Einstellungskombinationen zu überprüfen. In den Vorversuchen werden daher die Maschinenparameter an ausgewählten Werkzeugen und Werkstücken eingegrenzt und diverse Faktoren und Faktorstufen untersucht. Die Einstellungen der Faktoren werden als Stufen oder Level bezeichnet. Zum besseren Verständnis wird der Terminus Faktorstufen gewählt. [75, S. 6] Nach einer Eingrenzung des Systems folgen in den Hauptversuchen gezielte Analysen zu Werkzeug und Werkstück.

Durch Stör- und Signalgrößen werden die nicht oder die nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand beeinflussbaren Eingangsgrößen beschrieben [75, S. 148]. Im Gegensatz zu den

Steuergrößen befinden sich die **Störgrößen** außerhalb der Systemgrenzen und sind einer nicht kontrollierbaren Schwankung ausgesetzt [75, S. 149]. Störgrößen der experimentellen Versuchsreihen sind beispielsweise die Raumtemperatur und die Fertigungstoleranzen der untersuchten Trennwerkzeuge und Werkstücke. Einflüsse, die aus atmosphärischen Bedingungen wie Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit resultieren, können insofern konstant gehalten werden, da die experimentellen Versuchsreihen in der Versuchshalle des TMB durchgeführt werden. Zusätzlich werden die atmosphärischen Bedingungen in regelmäßigen Abständen durch ein Thermometer kontrolliert. Auf mögliche fertigungstechnische Unterschiede hervorgerufene Störgrößen und dadurch verursachte Streuungen der Messwerte kann keinen Einfluss genommen werden. Um diese Störgrößen bestmöglich zu minimieren, werden die Werkzeuge und Werkstücke stets bei denselben Herstellern bzw. Firmen beschafft.

Signalgrößen definieren den Betriebsbereich des Systems [75, S. 149] und damit die Randbedingungen der experimentellen Versuchsdurchführung [9, S. 48]. Der Betriebsbereich wird u.a. durch das Kooperationsprojekt „RoTre“ abgesteckt. Es soll ein Rohrintrennsystem für Rohrleitungen im Durchmesserbereich von 100 - 400 mm für (Edel-)stahl konzipiert werden, wobei der Trennvorgang durch Fräsen, Sägen oder Schleifen realisiert werden soll. Zudem wird der Betriebsbereich durch die Kenndaten der ausgewählten Komponenten, wie z.B. durch die Antriebsdrehzahlen der Motoren, festgelegt.

Die Ausgangsgrößen im Parameterdiagramm in Abbildung 4.1 teilen sich in erwünschte und unerwünschte Ergebnisse auf. In der Fachsprache kennzeichnen die sogenannten „**error states**“ die **unerwünschten Ergebnisse**. Im beschriebenen System fallen darunter u.a. während der Versuchsdurchführung hervorgerufene Schwingungen oder Geräusche, die durch das Trennen von (Edel-)stahl durch Fräsen, Sägen oder Schleifen entstehen. Da bei guten Systemen die „error states“ grundsätzlich nicht vorkommen sollten [75, S. 150], wird der Versuchsstand ausreichend gegen Schwingungen versteift. Die erzeugten Geräusche bei der Rohrintrennung haben keinen Einfluss auf die erwünschten Ergebnisse und werden daher nicht weiter betrachtet. Unter dem Aspekt der Arbeitssicherheit ist während der Versuchsdurchführung ein Gehörschutz zu tragen.

Die **erwünschten (positiven) Ergebnisse** werden auch als Qualitätsmerkmale bezeichnet. Für die Versuchsplanung und die Auswahl der Messtechnik ist die Definition der Qualitätsmerkmale bzw. Zielgrößen essentiell, da das gesamte System hinsichtlich dieser Merkmale untersucht wird. In den experimentellen Untersuchungen zur Rohrintrennungen sollen die Qualitätsmerkmale Volumenabtrag, Schnittkraft-, Wärme- und Staubentwicklung sowie der Massenverlust analysiert werden. Der Abtrag, d.h. die Schnittgüte des erzielten Rohrintrennschnittes, soll maximiert und die restlichen Qualitätsmerkmale minimiert werden. Die Untersuchungen zur Schnittkraft sind hinsichtlich der Auslegung der Komponenten einer Rohrintrennvorrichtung wie beispielsweise die der Wellen, Gewindestangen etc., notwendig. Zudem haben die entstehenden Schnittkräfte zusammen mit den Qualitätsmerkmalen Wärmeentwicklung und Massenverlust Auswirkungen auf die Standzeit des Trennwerkzeuges. Die Untersuchung der Staubkonzentration ist dahingegen für die am Rückbau beteiligten Personen relevant. Die Definition mehrerer Qualitätsmerkmale ist unproblematisch, da die Erfassung unabhängig voneinander erfolgt [75, S. 4].

Die folgenden Abschnitte geben eine genaue Betrachtung der drei Parametergruppen – Trennwerkzeug, Werkstück und Maschine – nach Tabelle 4.1 wieder. Die Parametergruppe Maschine umfasst die Beschreibung des Versuchsstandes einschließlich der Messtechnik und Methodik zur Zielgrößenbestimmung.

4.2 Trennwerkzeuge

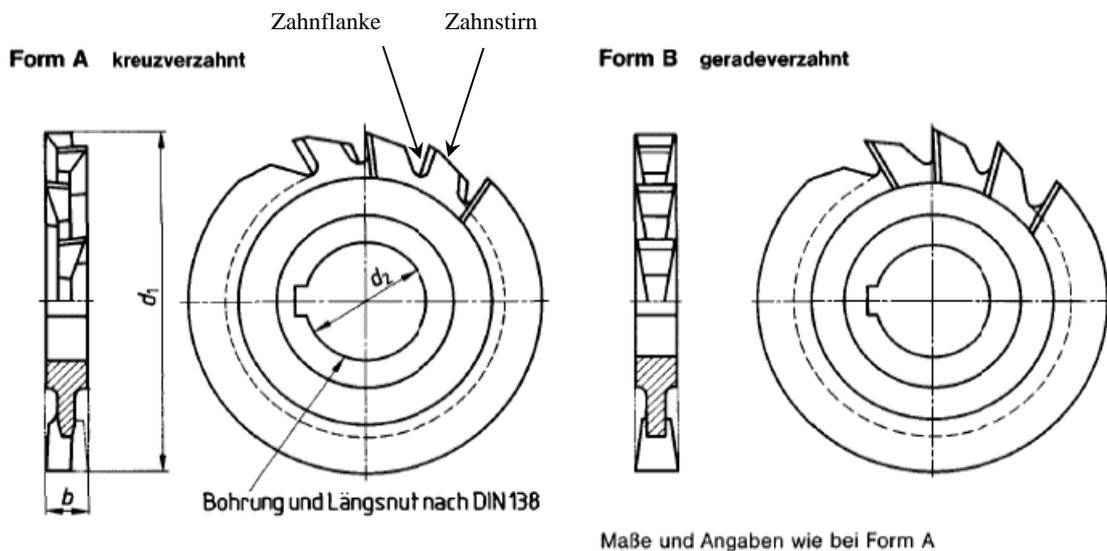
Nach *DIN 8580* [55, S. 5] ist ein Werkzeug ein Fertigungsmittel, „das durch Relativbewegung gegenüber dem Werkstück unter Energieübertragung die Bildung seiner Form oder die Änderung seiner Form und Lage, bisweilen auch seiner Stoffeigenschaften bewirkt.“ In der vorliegenden Arbeit sind hierunter demnach die Trennwerkzeuge – Scheibenfräser, Kreissägeblätter und Trennscheiben – mit welchen die Rohrintrennung erfolgt, zu verstehen. Wie innerhalb des Stands der Technik zur Rohrtrennung aufgezeigt wurde, werden diese Trennwerkzeuge in der Praxis zum Rohrleitungsrückbau eingesetzt und eignen sich daher für den Anwendungsfall der Rohrintrennung. Gemäß der Übersicht zu Werkstoffen für Rohrleitungssysteme in kerntechnischen Anlagen in Tabelle 2.2, müssen die Werkzeuge vorwiegend eine Bearbeitung von (Edel-)stahl zulassen.

Nachfolgend werden zuerst Grundlagen zu den Trennwerkzeugen Scheibenfräser und Kreissägeblätter erläutert. Anschließend werden die in den experimentellen Versuchsreihen untersuchten Ausführungen vorgestellt. Abschluss von Absatz 4.2 bilden die Grundlagen zu Trennscheiben zusammen mit den ausgewählten Trennscheiben zur Versuchsdurchführung.

4.2.1 Scheibenfräser und Kreissägeblätter

Scheibenfräser sind Werkzeuge, die die Form einer Scheibe mit z.B. geraden oder gewinkelten Schneiden an der Oberfläche haben und in der Metallbearbeitung u.a. in CNC-Fräsmaschinen zur präzisen Bearbeitung von Oberflächen angewendet werden [76]. Wesentliche Angaben zur Beschreibung eines Scheibenfräasers sind u.a. der Scheibendurchmesser d_1 , der Bohrungsmesser d_2 und die Schnittbreite b . Alle Angaben werden in der Einheit Millimeter [mm] angegeben und werden im weiteren Verlauf der Arbeit gemäß der schematischen Darstellung eines Scheibenfräasers in Abbildung 4.2 links verwendet. Die genannten Angaben gelten auch für die Bezeichnung von Kreissägeblättern und Trennscheiben.

Wie anhand von Abbildung 4.2 ersichtlich wird, können die Schneiden eines Scheibenfräasers nach *DIN 1834 Teil 1* [77, S. 1] kreuzverzahnt oder geradeverzahnt angeordnet werden. Bei Scheibenfräsern mit geradeverzahnter Ausführung sind alle Zähne bei der Bearbeitung im vollständigen Eingriff während bei einer kreuzverzahnten Ausführung nur die Zahnstirn und die Zahnflanke im Eingriff sind [78]. Die wechselseitige Schrägverzahnung führt zu einem ruhigen Lauf, selbst bei tiefen Schnitten [79]. Infolgedessen kommt in der Versuchsdurchführung ein kreuzverzahnter Scheibenfräser zum Einsatz.



d_1 : Scheibendurchmesser [mm] d_2 : Bohrungsdurchmesser [mm] b : Schnittbreite [mm]

Abbildung 4.2: links: Scheibenfräser kreuzverzahnt; rechts: Scheibenfräser geradeverzahnt, nach [77, S. 1]

Wie Scheibenfräser, werden **Kreissägeblätter** zur spanenden Trennung von Werkstücken in Kreissägen bzw. in den dazugehörigen Werkzeugmaschinen eingesetzt. Kreissägeblätter sind dünne, kreisrunde Stahlscheiben, deren Außenseite mit einer Zahnung versehen ist. In den experimentellen Versuchsreihen werden einteilige Kreissägeblätter, d.h. Sägeblätter die beispielsweise aus Bandstahl oder Hochgeschwindigkeitsstahl herausgestanzt sind, und Verbundkreissägeblätter verwendet. Letztere bestehen aus einem Metalltraggkörper, an welchen Zähne aus u.a. Hartmetall angebracht sind. [80]

Sowohl bei Scheibenfräsern als auch Kreissägeblättern spielt der **Schneidstoff** eine wesentliche Rolle, um u.a. eine hohe Verschleißfestigkeit gewährleisten zu können. Schneidstoffe sind nach *Hirsch* [81, S. 17] Werkstoffe „aus denen die Schneide besteht und die somit direkt an der Spanbildung beteiligt sind.“ Eine große Härte, Zähigkeit, Verschleiß-, Druck- und Biegefestigkeit sind wesentliche Eigenschaften, die Schneidstoffe aufweisen sollten, um den zu erwartenden hohen Beanspruchungen beim Zerspanungsprozess gerecht zu werden [81, S. 17]. Schneidstoffe können gemäß *Hirsch* [81, S. 17] eingeteilt werden in:

- Unlegierte und legierte Werkzeugstähle
- Schnellarbeitsstähle
- Gegossene Hartlegierungen
- Vollhartmetall
- Schneidkeramik
- Superharte Schneidstoffe (Vickershärte $> 50.000 \text{ N/mm}^2$): z.B. natürlicher oder synthetischer Diamant, hartes Bornitrid, Verbund- und Mischschneidstoffe

Ein Vergleich der Schneidstoffe nach Zähigkeit und Verschleißfestigkeit etc. ist in Abbildung 4.3 gegeben; blau hinterlegte Schneidstoffe werden in den experimentellen Ver-

suchsreihen eingesetzt. Demnach werden in der vorliegenden Arbeit Scheibenfräser und Kreis-sägeblätter aus Schnellarbeitsstahl (HSS; engl. High Speed Steel) mit und ohne Werkzeugbeschichtung sowie beschichtetes Vollhartmetall (VHM) untersucht. Ausschlaggebend für die Wahl der Schneidstoffe ist, dass HSS und VHM u.a. für die Anwendung von (Edel-)stahl geeignet sind und Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen größtenteils hieraus gefertigt sind. Es folgt daher eine genauere Betrachtung dieser beiden Schneidstoffe einschließlich der Auswirkungen bzw. Eigenschaften einer Werkzeugbeschichtung.

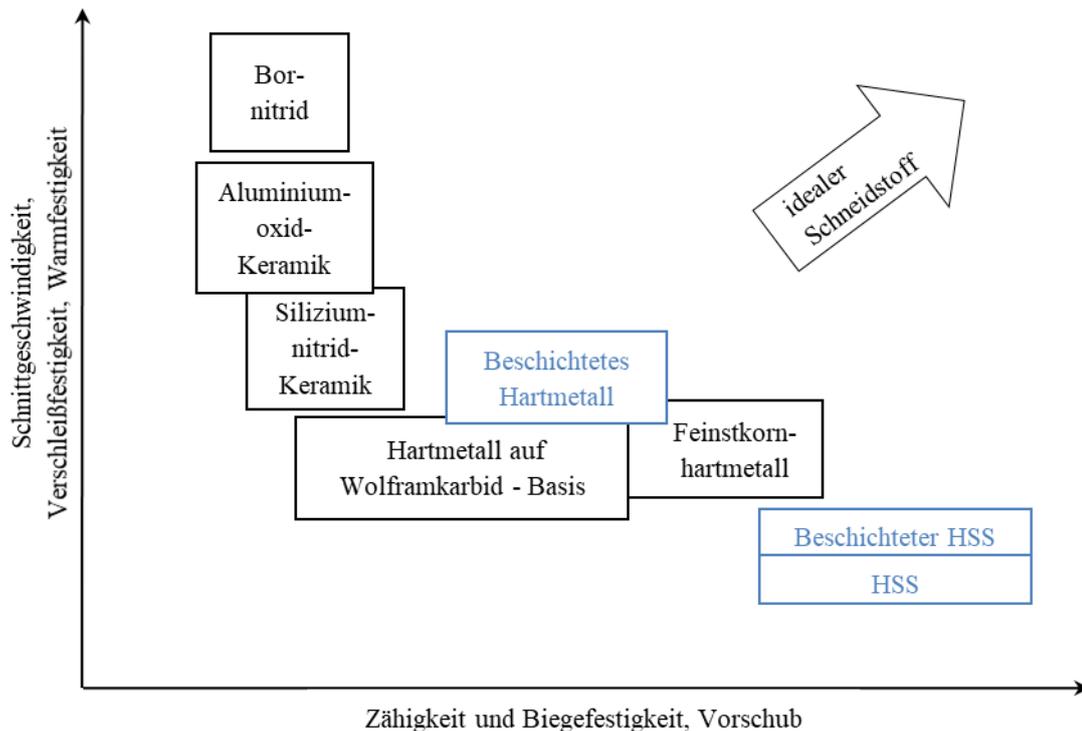


Abbildung 4.3: Schematische Einteilung von Schneidstoffen nach ausgewählten Kriterien, nach [82, S. 114]

Bei **Schnellarbeitsstählen** handelt es sich nach *Denkena und Tönshoff* [83, S. 171] um hochlegierte Werkzeugstähle mit bis zu 35 % Anteil an Legierungselementen¹². Werkstoffe aus HSS zeichnen sich u.a. durch eine große Härte und Verschleißfestigkeit aus [83, S. 172] und halten nach *DIN EN ISO 4957* [84, S. 6] einer Warmhärte und Anlassbeständigkeit bis 600 °C stand. Schnellarbeitsstähle können aufgrund verschiedenster Legierungszusammensetzungen und durch eine Wärmebehandlung u.a. für die Herstellung von Gewindebohrern, Drehmeißeln und Fräsern etc. eingesetzt werden [81, S. 17]. Die Eigenschaften von Schnellarbeitsstählen werden maßgeblich durch die Legierungselemente Wolfram und Molybdän beeinflusst [83, S. 172].

Werkzeuge aus **VHM bzw. Hartmetall (HM)** bestehen aus einer Hartmetalllegierung und können neben Wolframkarbid und Kobalt auch auf Basis von anderen Karbiden wie beispiels-

¹² Legierungselemente sind chemische Elemente wie Aluminium, Chrom und Kohlestoff, die zur gezielten Eigenschaftsveränderung, wie z.B. der Erhöhung der Festigkeit, Verbesserung der Verformbarkeit oder zur Steigerung des Verschleiß- und Korrosionswiderstands, einem metallischen Werkstoff hinzugefügt werden [154, S. 37].

weise Titankarbid, Tantalkarbid und Niobkarbid gebildet werden [82, S. 137]. Wie dem Diagramm in Abbildung 4.3 zu entnehmen ist, weisen Hartmetalle im Vergleich zu Schnellarbeitsstählen eine geringere Zähigkeit und Biegefestigkeit auf, wohingegen die Verschleiß- und Warmfestigkeit höher ist. Zusätzlich halten Werkzeuge aus VHM höheren Schnittgeschwindigkeiten stand und sind besonders für die Zerspanung von harten Materialien wie z.B. Stahl, Gusseisen und Edelstahl prädestiniert. [85], [82, S. 114] Infolge ihrer Leistungsparameter und der hohen Lebensdauer, sind Werkzeuge aus VHM in der Anschaffung teurer als Werkzeuge aus Schnellarbeitsstählen [86].

Eine Erhöhung der Standzeit und Schnittgeschwindigkeit kann nach *Dietrich und Richter* [87, S. 47] durch eine **Beschichtung der Werkzeuge** erreicht werden. Beim Beschichten wird ein Beschichtungswerkstoff wie z.B. Titannitrid, Titancarbonitrid oder Titanaluminiumnitrid auf die Werkstoffoberfläche aufgetragen und eine festhaftende Schicht gebildet. Die in der vorliegenden Arbeit ausgewählten Werkzeuge haben eine Beschichtung aus Titanaluminiumnitrid (TiAlN), sprich aus den Elementen Titan, Aluminium und Stickstoff. Laut der *RUKO GmbH Präzisionswerkzeuge* [88], wirkt sich die zwischen 1 - 4 µm starke TiAlN-Beschichtung positiv auf die Warmhärte- und Oxidationsbeständigkeit aus, wodurch die Arbeitsvorgänge durch eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit beschleunigt werden können. Negative Auswirkungen hat das Beschichten dahingegen auf die Schneidkanten. Zurückzuführen ist dies auf die Erhöhung des Radius von 20 - 100 µm der Schneidkanten, was eine Verminderung der Schärfe zu Folge hat. [89] Beschichtungen mit TiAlN können u.a. für die Zerspanung von harten Werkstoffen wie Stahl ($N/mm^2 < 1.100$ und rostfreiem Stahl (Edelstahl) oder auch für Aluminium, Messing oder Kunststoff angewendet werden. Grundsätzlich ist das Kühlen von TiAlN-beschichteten Werkstoffen nicht zwingend erforderlich. Die positiven Eigenschaften durch eine TiAlN-Beschichtung spiegeln sich i.d.R. im Preis der Werkzeuge wieder. [88] Dies belegen auch die in Tabelle 4.3 aufgeführten Preise der zwei ausgewählten beschichteten Kreissägeblätter gegenüber dem unbeschichteten Kreissägeblatt.

4.2.1.1 Scheibenfräser und Kreissägeblätter für experimentelle Versuchsreihen

Die Auswahl des Scheibenfräasers und der Kreissägeblätter für die Versuchsdurchführung zur Rohrintrennung basiert auf der vorangegangenen Analyse zu geeigneten Schneidstoffen für Rohrleitungen aus (Edel-)stahl. Speziell für den häufig in kerntechnischen Anlagen verwendeten Werkstoff mit der Kurznummer 1.4541 wird für eine spanende Bearbeitung ein Werkzeug aus HSS empfohlen, weil eine Neigung zur Kaltverfestigung besteht [90]. Daher werden der in Tabelle 4.2 aufgeführte Scheibenfräser bzw. das in Tabelle 4.3 genannte Kreissägeblatt als Trennwerkzeuge für die Vorversuche gewählt. Nachdem mit diesen Trennwerkzeugen geeignete Parameter für die Versuchsdurchführung zur Rohrintrennung identifiziert werden konnten, werden in den Hauptversuchen weitere Ausführungen untersucht. Aufgrund der Vielzahl an Parametern wie Durchmesser, Wanddicke, Ausführung und Zähnezahl, war es nicht möglich, Scheibenfräser bzw. Kreissägeblätter mit den identischen Eingangsgrößen zu wählen, die sich lediglich in dem Schneidstoff und der Beschichtung unterscheiden.

Neben einer Recherche zur Auswahl geeigneter Werkzeuge, wurden persönliche Gespräche mit Mitarbeitern der Hoffmann Group geführt. Es sollte sichergestellt werden, dass geeignete Werkzeuge in den experimentellen Versuchsreihen untersucht werden. Es wurden u.a. auch die

zugelassenen Werkstoffe von Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen und die Randbedingungen des Versuchsstandes thematisiert. In den zwei folgenden Tabellen sind die wichtigsten Kenndaten des ausgewählten Scheibenfräasers bzw. der ausgewählten Kreissägeblätter zusammengestellt.

Tabelle 4.2: Daten Scheibenfräser experimentelle Versuchsreihen

Abkürzung Scheibenfräser in vorliegender Arbeit	SF1 (HSS) Scheibenfräser aus HSS (unbeschichtet)
Bezeichnung Scheibenfräser Hersteller	Schmaler Scheibenfräser unbeschichtet, ø×Breite js16×k11: 125x3mm [79]
Hersteller	Garant
Abbildung Werkzeug	
Schneidstoff	HSS Co5 ^b
Beschichtung	unbeschichtet
Scheibendurchmesser [mm] ^a	125
Scheibenbreite [mm] ^a	3
Bohrungsdurchmesser [mm] ^a	32
Zähnezahl Z	40
Fräsprofil	kreuzverzahnt
Geeignet für Werkstoff	u.a. Stahl, INOX ^c , Alu (kurzspanend)
Produktart	Scheibenfräser
Stückpreis, inkl. MwSt. [€] ^d	228,48

^a: vgl. Abbildung 4.2

^b: Das Legierungselement Kobalt (Co) führt zu einer Verschiebung der Grenze der Überhitzeempfindlichkeit zu höheren Temperaturen. Hierdurch kann eine höhere Härtetemperatur erzielt werden, da mehr Karbide in Lösung gehen und infolgedessen die Wärmehärte steigt. [82, S. 122]

^c: INOX ist auf das französische Wort inoxydable zurückzuführen und bedeutet „nicht oxidierbar“ oder „rostfrei“. Im allgemeinen Sprachgebrauch ist mit INOX Edelstahl gemeint. [91, S. 3]

^d: Stand 06/2024

Tabelle 4.3: Daten Kreissägeblätter experimentelle Versuchsreihen

Abkürzung Kreissägeblatt in vorliegender Arbeit	KSB1 (HSS) Sägeblatt aus HSS (unbeschichtet)	KSB2 (HSS, TiAlN) Sägeblatt aus HSS (beschichtet)	KSB3 (VHM, TiAlN) Sägeblatt aus VHM (beschichtet)
Bezeichnung Kreissägeblatt Hersteller	Metallkreissägeblatt fein, unbeschichtet, ø×Stärke: 125x3mm [92]	Kreissägeblatt, TiAlN, ø×Stärke: 125x2mm [93]	Kreissägeblatt, TiAlN, ø×Stärke: 125x2mm [94]
Hersteller	Re-Bo	Garant	Garant
Abbildung Werkzeug			
Schneidstoff	HSS	HSS	VHM
Beschichtung	unbeschichtet	TiAlN	TiAlN
Scheibendurchmesser [mm] ^a	125	125	125
Scheibenbreite [mm] ^a	3	2	2
Bohrungsdurchmesser [mm] ^a	22	22	22
Zähnezahl Z	100	42	50
Geeignet für Werkstoff	u.a. Stahl, INOX	u.a. Stahl, INOX, Alu (kurspanend), Alu Kunststoffe	u.a. Stahl, INOX, Alu (kurspanend)
Produktart	Kreissägeblatt	Kreissägeblatt	Kreissägeblatt
Stückpreis, inkl. MwSt. [€] ^b	94,96	297,50	605,71

^a: Es gelten dieselben Bezeichnungen wie bei einem Scheibenfräser (vgl. Abbildung 4.2)

^b: Stand 06/2024

4.2.2 Trennscheiben

Eine kurze Einführung zu Trennscheiben erfolgte bereits innerhalb der Analyse des Stands der Technik (vgl. Absatz 3.2.3). Durch die Erklärungen der Funktionsweise des Versuchsstandes in Absatz 4.4.1 wird ersichtlich, dass es sich bei den experimentellen Versuchsreihen nach *DIN EN 12413* [95, S. 7] um „zwangsgeführtes Schleifen und Trennschleifen“ handelt. In der *DIN EN 12413* [95, S. 7] wird diese Anwendungsart als ein „Verfahren, bei dem die Vorschubbewegung des Schleifwerkzeuges und/oder des Werkstücks durch mechanische Hilfsmittel geführt werden“ definiert. Trennschleifen wird in der genannten Norm [95, S. 7] als „Ablängen oder Schlitzen mit dem Umfang der Trennschleifscheiben“ bezeichnet.

Innerhalb der experimentellen Versuchsreihen liegt der Fokus der Untersuchungen auf dem Einfluss des Schleifmittels bei der Rohrintrennung und damit zusammenhängend auf den Betriebsparametern je Schleifmittel.

Nach *Denkena und Tönshoff* [83, S. 264] sowie der *August Rüggeberg GmbH & Co. KG* [96, S. 270], zählen Aluminiumoxid, Korund, Siliziumkarbid, kubisch kristallines Bornitrid (engl. Cubic Boron Nitride (CBN)) und Diamant zu den am häufigsten verwendeten Hartstoffen zum Schleifen. Wie Abbildung 4.4 zu entnehmen ist, weisen die Schleifmittel erhebliche Unterschiede in ihrer Härte und daraus resultierend in ihrer Verschleißfestigkeit auf [83, S. 264]. Die in blau hervorgehobenen Schleifmittel werden in den Versuchsreihen zur Rohrinrentrennung untersucht.

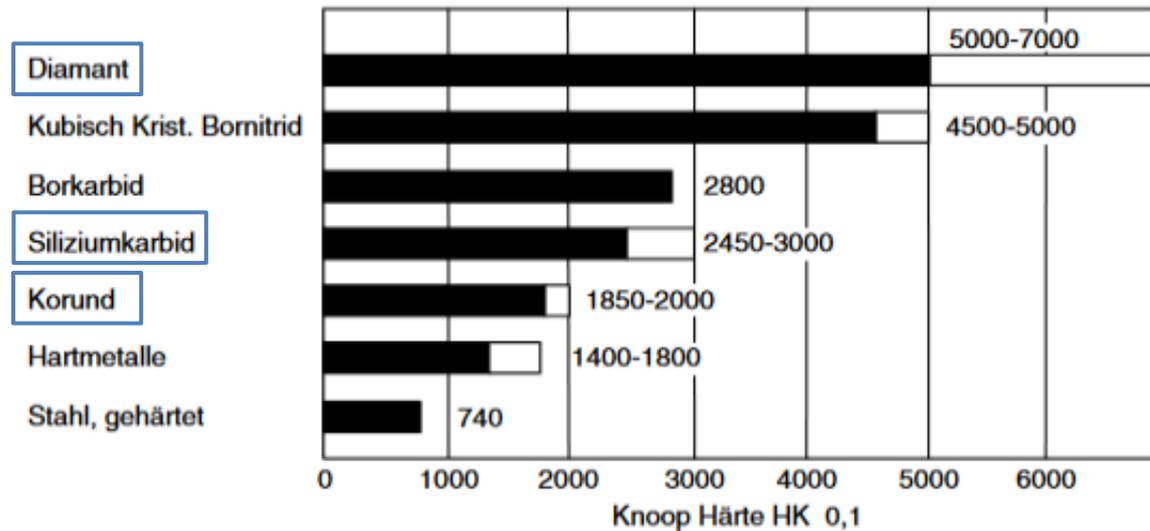


Abbildung 4.4: Knoop Härte (HK) von Schleif- und Werkstoffen [83, S. 264]

In der vorliegenden Arbeit werden mit Korund (A), Keramik (CER) und Diamant (D) drei Schleifmittel mit unterschiedlichen Härten untersucht. Korund hat nach Knoop¹³ eine Härte von 1.850 - 2.000 HK 0,1 und Siliziumkarbid, das zu den wichtigsten keramischen Werkstoffen zählt [83, S. 268], eine Härte von 2.450 - 3.000 HK 0,1. Diamant ist mit 5.000 - 7.000 HK 0,1 der härteste natürlich vorkommende Feststoff. [83, S. 264]

Bei **Korund (A)** handelt es sich um ein kristallines Aluminiumoxid (Al_2O_3) das aus Bauxit hergestellt wird. Bauxit ist ein Gemisch aus verschiedenen Aluminiumoxidhydraten mit Zusätzen aus Eisenhydroxiden, Silikaten und Titanverbindungen. Es wird zwischen den drei Korundarten Normal-, Halbedel- und Edelkorund, die jeweils eine unterschiedliche hohe Konzentration von Al_2O_3 aufweisen und in gesinteter oder geschmolzener Form vorliegen können, unterschieden. [83, S. 265-266] Durch spezielle Herstellungsverfahren und Zusätze kann gezielt Einfluss auf die Härte und Zähigkeit von Korund ausgeübt werden [96, S. 270].

¹³ Zur Ermittlung der Härte nach Knoop wird gemäß *DIN EN ISO 4545-1* [155, S. 8-9] „ein Diamant-Eindringkörper in Form einer Pyramide mit rhombischer Grundfläche, bei dem die Winkel α und β zwischen den gegenüberliegenden Kanten $172,5^\circ$ bzw. 130° am Scheitelpunkt betragen, in die Oberfläche einer Probe eingedrückt.“ Anschließend wird die „lange Diagonale d des Eindruckes, der nach Rücknahme der Prüfkraft F auf der Prüffläche verbleibt“, gemessen. Die Bezeichnung der Knoop-Härte (HK) wird an folgendem Beispiel erklärt: 640 HK 0,1. Die Zahl 640 steht für den Knoop-Härtewert, HK ist das Symbol der Härte und 0,1 spiegelt den ungefähren kgf-Wert entsprechend der aufgebrauchten Prüfkraft wieder ($0,1 \text{ kgf} = 0,9807 \text{ N}$) [155, S. 8].

Die Eigenschaften technischer **Keramik (CER)** werden stark durch das Grundmaterial wie beispielsweise Zirkonoxid oder Aluminiumoxid sowie durch die Anzahl der Fehlstellen und durch das Brennverfahren beeinflusst [97]. Je nach Grundmaterial der technischen Keramik, sind im Keramik Korn u.a. feine Aluminiumoxid (Al_2O_3) - Kristalle enthalten, welche durch einen Sinterungsprozess miteinander verbunden sind. Während des Schleifprozesses führen die auftretenden Schleifkräfte dazu, dass Mikrokristalle herausbrechen. Auf diese Weise bildet das Schleifkorn regelmäßig neue, scharfe Schneidkanten aus. [98, S. 23]

Diamant (D) zählt zusammen mit kubisch kristallinem Bornitrid zu den hochharten Schleifmitteln [83, S. 268]. Diamant besteht aus reinem kubisch kristallinen Kohlenstoff, der als Schleifmittel ausschließlich als synthetischer Diamant eingesetzt wird. Mittels verschiedener Synthesebedingungen, können die Eigenschaften des Diamantschleifkorns für die Anwendung als Schleifmittel abgestimmt werden. Aufgrund der großen Härte von Diamant sind die Schneidkanten sehr widerstandsfähig gegen Abstumpfen und zeichnen sich infolgedessen durch eine sehr hohe Standzeit aus. Sowohl Diamant als auch CBN- Schleifmittel stellen i.d.R. eine wirtschaftliche Alternative für die Bearbeitung bestimmter Werkstoffe gegenüber den konventionellen Schleifmitteln wie Korund oder Siliziumkarbid dar. [96, S. 270,428]

Trennscheiben bestehen aus Schleifmitteln wie z.B. Korund und Siliziumkarbid, die durch Bindestoffe oder Bindungen im Schleifwerkzeug gehalten werden und aus schleifaktiven Füllstoffen. Diese Bestandteile werden zwischen zwei Glasfasereinlagen auf einen Metallring in verschiedenen Durchmessern und Stärken gepresst [99]. Zu den wichtigsten Bindungen zählen keramische und metallische Bindungen sowie Kunstharzbindungen [83, S. 270]. Die ausgewählten Trennscheiben aus Keramik und Korund haben eine faserverstärkte Kunstharzbindung, die bis 80 m/s Umfangsgeschwindigkeit zugelassen ist [100, S. 11]. Der schematische Aufbau einer Trennscheibe mit konventionellen Schleifmitteln ist am Beispiel der Firma RHODIUS in Abbildung 4.5 zu sehen.



Abbildung 4.5: Aufbau einer Trennscheibe mit konventionellen Schleifmitteln, nach [101, S. 2]

Der Aufbau einer Diamant-Trennscheibe unterscheidet sich von dem Aufbau einer Trennscheibe mit Schleifmitteln wie Korund und Keramik. Anhand der ausgewählten Trennscheibe der Firma Tyrolit - Schleifmittelwerke Swarovski AG & Co K.G. für die experimentellen Versuchsreihen wird in Abbildung 4.6 der Aufbau einer Diamant-Trennscheibe erläutert. Die Trennscheibe besteht aus einem Stammblatt aus gehärtetem Werkzeugstahl, welches über eine geeignete Segmentverbindung fest mit den Diamantsegmenten verbunden ist. Die dauerhafte Verbindung von Stammblatt und Diamantsegmenten kann entweder durch Verschweißen (Laserschweißmethode) oder Sintern (Sintermethode) erzeugt werden. Ausschlaggebend für eine hohe Standzeit der Scheibe sind die richtige Anzahl an Diamanten und die Zusammensetzung der Bindung. [102, S. 277]

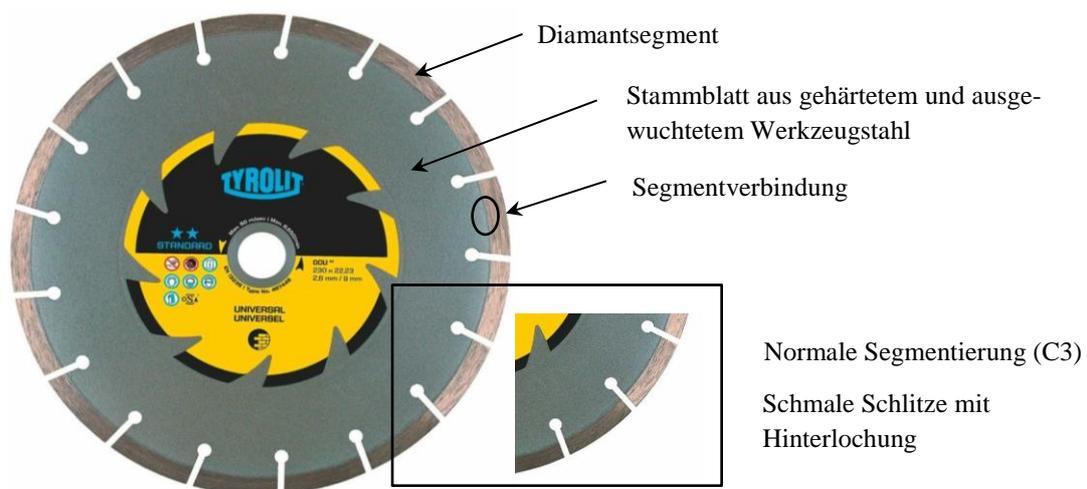


Abbildung 4.6: Aufbau Trennscheibe mit Schleifmittel Diamant, nach [102, S. 276-277], [103, S. 1]

Bei Trennscheiben mit Schleifmittel Diamant können außer der Stammbblattgeometrie verschiedene Stammbblattformen unterschieden werden. Die in den experimentellen Versuchsreihen zu untersuchende diamantbesetzte Trennscheibe weist eine normale Segmentierung (C3), d.h. schmale Schlitze mit einer Hinterlochung, auf. Durch diese Geometrie können eine gute Hitzeverträglichkeit und ein sicherer Materialabtransport gewährleistet werden. Weitere Stammbblattformen sind u.a. eine normale diamantbesetzte Segmentierung, eine weite Segmentierung oder ein geschlossener Schneidrand. [102, S. 276]

4.2.2.1 Trennscheiben für experimentelle Versuchsreihen

Ausgehend von einer ausführlichen Recherche und Kontaktaufnahme mit verschiedenen Werkzeugherstellern wie der August Rüggeberg GmbH & Co. KG, Metabowerke GmbH, Saint-Gobain Abrasives GmbH, Osborn GmbH, Tyrolit - Schleifmittelwerke Swarovski AG & Co K.G. und der Hoffmann Group etc. erfolgte die Auswahl der Trennscheiben. Entscheidend war, dass die Trennscheiben für den geplanten Anwendungsbereich sowie für die ausgewählten Werkstoffe geeignet sind. Die Diamant-Trennscheibe wurde federführend für die Trennung von einbetonierten Rohrleitungen ausgewählt. Laut den Datenblättern der zu analysierenden Werkzeuge sind diamantbesetzte Trennscheiben für einen universalen Einsatzbereich wie u.a. Beton und Stahl geeignet. Dahingegen stumpfen Scheibenfräser und Kreissägeblätter bei einem Kontakt mit Beton direkt ab. Die Trennscheiben mit Schleifkorn Keramik und Korund erlauben gemäß Herstellerangaben eine Anwendung bei INOX und Stahl und sind damit ebenfalls geeignet für die Werkstoffe der Prüfkörper.

Die Daten der ausgewählten Trennscheiben sind in Tabelle 4.4 für einen Scheibendurchmesser von je 125 mm gegenübergestellt.

Tabelle 4.4: Daten Trennscheiben experimentelle Versuchsreihen

Abkürzung Trennscheibe in vorliegender Arbeit	TS1 (CER) Trennscheibe Keramik	TS2 (A) Trennscheibe Korund	TS 3 (D) Trennscheibe Diamant
Bezeichnung Trennscheibe Hersteller	CerRapid Trennscheibe EXTRA SCHMAL, Stahl, INOX [104]	Trennscheibe Hochleistungsausführung X-LOCK EXTRA SCHMAL, INOX [105]	Diamant-Trennscheibe STANDARD** Universal [103]
Hersteller	Garant	Garant	Tyrolit - Schleifmittelwerke Swarovski AG & Co K.G.
Abbildung Werkzeug			
Schleifmittel (Schleifmittelkurzzeichen)	Keramik (CER)	Korund (A)	Diamant (D)
Eisen-, Schwefel- und Chloranteil	< 0,1%	< 0,1%	-
Bindung	faserverstärkte Kunstharzbindung	faserverstärkte Kunstharzbindung	-
Scheibendurchmesser [mm] ^a	125	125	125
Scheibenbreite [mm] ^a	1	1	2
Bohrungsdurchmesser [mm] ^a	22,23	22,23	22,23
Bauform (BF)	BF 41	BF 41	BF 41
Geeignet für Werkstoff	u.a. INOX, Stahl	u.a. INOX, Stahl	Universal, u.a. Beton, Stahl, Stein etc.
Max. Umfangsgeschwindigkeit V_c [m/s] ^b	80	80	80
Max. Drehzahl n [1/min] ^b	12.200	12.200	12.200
Produktart	Trennscheibe	Trennscheibe	Trennscheibe
Stückpreis, inkl. MwSt. [€] ^c	5,51	3,78	40,46

^a: Es gelten dieselben Bezeichnungen wie bei einem Scheibenfräser (vgl. Abbildung 4.2).

^b: Die Begriffe werden in Absatz 4.4.2 innerhalb der Funktionsbeschreibung des Versuchsstandes definiert.

^c: Stand 06/2024

Alle Trennscheiben haben eine gerade Bauform (BF41). Dies bietet den Vorteil, dass die Scheibe aufgrund der geraden Form tiefer in das Werkstück eindringen kann und ist ausschlaggebend für die Wahl der Bauform in der vorliegenden Arbeit. Neben einer geraden Ausführung gibt es auch gekröpfte Scheiben (BF42), zu sehen in Abbildung 4.7 rechts. Im Vergleich zu der geraden Ausführung haben gekröpfte Trennscheiben eine höhere Stabilität [106]. Die Versuchsreihen mit geraden Trennscheiben haben gezeigt, dass die Stabilität der Trennscheiben ausreichend ist, weshalb die Hauptversuche nicht auf gekröpfte Scheiben ausgeweitet werden müssen.

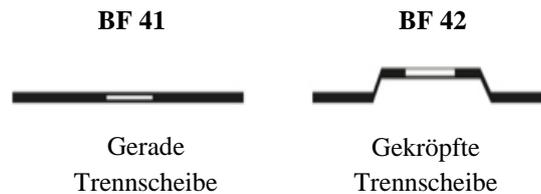


Abbildung 4.7: Bauformen von Trennscheiben [99]

Die ausgewählte Trennscheibe mit selbstschärfendem Keramik Korn hat ein X-LOCK System. Hierdurch ist ein schneller und werkzeugloser Scheibenwechsel möglich [105, S. 1]. Ein Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse geht hiervon nicht aus und ist im Weiteren nicht relevant. Für die Scheibe wird eine entsprechende Aufnahme für die Antriebswelle gefertigt.

Die in Tabelle 4.4 aufgeführte maximale Umfangsgeschwindigkeit und Drehzahl je Trennwerkzeug beruhen auf der DIN EN 12413 [107, S. 59]. In Abhängigkeit des Scheibendurchmessers und der maximalen Umfangsgeschwindigkeit, ergibt sich eine maximal zulässige Drehzahl für Schleifwerkzeuge. Tabelle 4.5 gibt die Richtwerte gemäß der DIN EN 12413 wieder.

Tabelle 4.5: Umrechnung der Betriebsgeschwindigkeit gemäß DIN EN 12413, nach [107, S. 59]

Umrechnung Betriebsgeschwindigkeit gemäß DIN EN 12413			
Scheibendurchmesser [mm]	Maximale Umfangsgeschwindigkeit V_c [m/s]		
	63	80	100
	Drehzahl n [min^{-1}]		
76	15.850	20.150	25.150
100/102	12.100	15.300	19.100
115	10.500	13.300	16.650
125	9.650	12.250	15.300
150/152	8.050	10.200	12.700
180	6.700	8.500	10.650
230	5.250	6.650	8.350
250/254	4.850	6.150	7.650
300/305	4.050	5.100	6.400
350/356	3.450	4.400	5.500
400/406	3.050	3.850	4.800

Durch die letzten Abschnitte erfolgte eine genaue Definition und Abgrenzung der Parametergruppe Werkzeuge. Nun folgt die Beschreibung der Werkstücke.

4.3 Werkstücke

Gemäß *DIN 8580* [55, S. 5] wird in der Fertigung ein Werkstück als ein geometrisch bestimmter Körper bezeichnet, dessen Veränderung mit Werkzeugen, „die unmittelbar, über Wirkmedien“¹⁴

¹⁴ Bei einem Wirkmedium handelt es sich um einen formlosen, festen, flüssigen oder gasförmigen Stoff, durch welchen das Werkstück verändert wird. Die Veränderung wird durch verschiedene Energieformen (z.B. Wärme, mechanische Energie) oder durch chemische Reaktionen erzeugt. [55, S. 6]

oder durch Übertragung von Wirkenergie¹⁵ wirken“, erfolgt. In der vorliegenden Arbeit sind unter Werkstücken folglich die zu untersuchenden Rohrleitungen zu verstehen. In den Versuchsreihen werden mit freiliegenden und einbetonierten Werkstücken zwei Ausführungen von Werkstücken unterschieden. Da die in kerntechnischen Anlagen verwendeten Rohrleitungen möglichst praxisnah nachgebildet werden sollen, werden Werkstücke mit und ohne Längsschweißnaht untersucht. Durch die Versuchsdurchführung an unterschiedlichen Werkstücken soll u.a. die erste Forschungsfrage, welche in Absatz 1.2 definiert wurde, beantwortet werden.

Ausschlaggebend für die Wahl der Werkstücke war eine Literaturrecherche im Regelwerk des KTAs und die daraus resultierende Zusammenstellung der zugelassenen Werkstoffe in kerntechnischen Anlagen, zu vergleichen in Absatz 2.3.4. Zusätzlich fand ein Austausch zu verwendeten Rohrleitungen in Kernkraftwerken hinsichtlich Werkstoff, Durchmesser und Wandstärke mit der Firma Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH, der RWE Nuclear GmbH sowie mit dem Vorsitzenden des VGB Power Tech e.V. Arbeitskreises „Komponentenintegrität“ im Jahr 2020 statt. Seit April 2022 trägt der internationale Fachverband für die Erzeugung und Speicherung von Strom und Wärme den Namen „vge energy e.V.“ Der Verband ist ein freiwilliger Zusammenschluss von verschiedenen Unternehmen der Kraftwerksbetreiber und -hersteller. [108] Durch den Austausch und die Kontaktaufnahme mit den genannten Unternehmen bzw. dem Fachverband soll die Auswahl praxisnaher Werkstücke sichergestellt werden.

4.3.1 Freiliegende Werkstücke

Die für die experimentellen Versuchsreihen ausgewählten Werkstücke mit je einer Länge von 0,5 m sind in Tabelle 4.6 aufgelistet und in Abbildung 4.8 zu sehen.

Tabelle 4.6: Daten freiliegende Werkstücke

Nr.	Kurzname	Werkstoffnummer	Außendurchmesser d_A [mm]	Wanddicke w [mm]	Innendurchmesser d_I [mm]	Ausführung
1	X6CrNiTi 18-10	1.4541	219,1	6,3	206,5	geschweißt
2	X6CrNiTi 18-10	1.4541	219,1	6,3	206,5	nahtlos
3	X6CrNiTi 18-10	1.4541	273,0	4,0	265,0	geschweißt
4	P235GH	1.0345	219,1	6,3	206,5	nahtlos

¹⁵ Unter Wirkenergie wird Energie aus einer Strahlung oder einem Energiefeld verstanden [55, S. 6].



Abbildung 4.8: Vorderansicht freiliegende Werkstücke für experimentelle Versuchsreihen; v.l.n.r.: Werkstücknummer 1 - 4

Werkstück 1 wird für die experimentellen Versuchsreihen als Standardrohr definiert, d.h. die Vorversuche zur Eingrenzung der Maschinenparameter, werden an diesem Rohr durchgeführt. Mit den in den Vorversuchen identifizierten Parametern an Werkstück 1 erfolgen anschließend Hauptversuche sowohl an Werkstück 1 wie auch an den restlichen Werkstücken. Die Abstufung der Rohraußendurchmesser wie auch die geringere Wanddicke von Werkstücknummer 3 sind auf das Lieferprogramm der Hersteller zurückzuführen.

Werkstück 1 und Werkstück 2 haben dieselben Abmessungen und sind aus demselben Werkstoff gefertigt. Der einzige Unterschied besteht in der Herstellung. Während Werkstück 1 eine Längsschweißnaht besitzt, ist Werkstück 2 nahtlos hergestellt. Anhand dieser beider Werkstücke soll in den experimentellen Versuchsreihen untersucht werden, ob bei der Rohrintrennung Unterschiede zwischen nahtlosen und geschweißten Rohrleitungen bestehen (Forschungsfrage 1). Abbildung 4.9 zeigt am Beispiel von Werkstück 1 eine Draufsicht und Großaufnahme einer Längsschweißnaht. Auf die Herstellungsverfahren für Rohrleitungen mit und ohne Längsschweißnaht wurde in Absatz 2.3.4 eingegangen.



Abbildung 4.9: Draufsicht und Großaufnahme Längsschweißnaht Werkstück 1

Um eine möglichst universelle Anwendung eines Rohrintrennsystems gewährleisten zu können, wird u.a. auch der Einfluss der Außendurchmesser der zu trennenden Rohrleitungen untersucht (Forschungsfrage 1). Werkstück 3 besitzt einen größeren Außendurchmesser (d_A : 273,00 mm) wie Werkstück 1 (d_A : 219,1 mm) und ist ebenfalls aus dem Werkstoff 1.4541 mit einer Längsschweißnaht hergestellt.

Mittels Versuchen an Werkstück 4 soll untersucht werden, ob die zuvor identifizierten Parameter an Werkstück 1 bzw. 2 sich auf einen unlegierten, warmfesten Stahl übertragen lassen (Forschungsfrage 1). Werkstück 4 weist dieselben Abmessungen wie Werkstück 1 und 2 auf, es ist lediglich aus einem anderen Werkstoff hergestellt. Werkstück 4 hat wie Werkstück 2 keine Längsschweißnaht.

Es folgt eine genauere Beschreibung der verwendeten Werkstoffe.

Chrom-Nickel-Edelstahl

Bei dem Werkstoff mit der Werkstoffnummer 1.4541 bzw. dem Kurznamen X6CrNiTi18-10, aus denen die Werkstücke 1-3 bestehen, handelt es sich um einen Chrom-Nickel-Edelstahl, der abgesehen von der Kerntechnik u.a. in der Automobil-, Bau- und Lebensmittelindustrie wie auch im Maschinenbau eingesetzt wird. Der Stahl gehört zu der Gruppe der austenitischen korrosionsbeständigen Stähle und hat einen Anteil von 17,0 - 19,0 % Chrom und 9,0 - 12,0 % Nickel. Als Stabilisator ist Titan enthalten. [109, S. 14], [110]

Die detaillierte chemische Zusammensetzung des Werkstoffes in Massenprozent nach DIN EN 10088-3 ist Tabelle 4.7 zu entnehmen. Ebenfalls aufgeführt sind die Werkstoffnummern weiterer zugelassener Werkstoffe für Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen aus austenitischen nichtrostenden Stählen nach Tabelle 2.2. Es soll verdeutlicht werden, dass sich die chemische Zusammensetzung dieser Werkstoffe nur geringfügig unterscheidet und daher für die Versuchsdurchführung lediglich ein austenitischer Stahl (hervorgehoben in blau) ausgewählt wurde.

Tabelle 4.7: Chemische Zusammensetzung austenitischer korrosionsbeständiger Stähle in Massenprozent gemäß DIN EN 10088-3, nach [109, S. 14-16]

Stahlbezeichnung		Massenanteil in %^{a)}							
Kurzname	Werkstoffnummer	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
X6CrNiTi18-10	1.4541	0,08	1,00	2,00	0,045	0,030	17,0 - 19,0	-	9,0 - 12,0
X5CrNi18-10	1.4301	0,07	1,00	2,00	0,045	0,030	17,5 - 19,5	-	8,0 - 10,5
X2CrNi19-11	1.4306	0,030	1,00	2,00	0,045	0,030	18,0 - 20,0	-	10,0 - 12,0
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	0,08	1,00	2,00	0,045	0,030	16,5 - 18,5	2,00 - 2,50	10,5 - 13,5
X6CrNiNb18-10	1.4550	0,08	1,00	2,00	0,045	0,015	17,0 - 19,0	-	9,0 - 12,0
X6CrNiMoNb17-12-2	1.4580	0,08	1,00	2,00	0,045	0,015	16,5 - 18,5	2,00 - 2,50	10,5 - 13,5

^{a)} Maximale Anteile, falls nicht anders angegeben.

mit: C = Kohlenstoff, Si = Silicium, Mn = Mangan, P = Phosphor, S = Schwefel, Cr = Chrom, Mo = Molybdän, Ni = Nickel

Austenitische Stähle zählen zu den hochlegierten Stählen und werden gemäß Abbildung 4.10 bezeichnet [111]. Der Kurzname ist wie folgt zu verstehen:

X 6 Cr Ni Ti 18-10

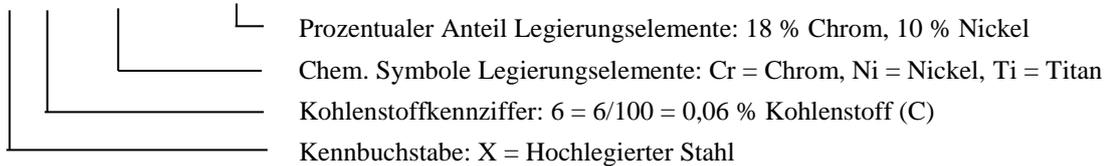


Abbildung 4.10: Bezeichnung hochlegierter Stähle am Beispiel des Kurznamen X6CrNiTi18-10, nach [111]

Baustahl (unlegiert, warmfest)

Der verwendete Werkstoff mit der Werkstoffkennnummer 1.0345 und Kurznamen P235GH für Werkstück 4 ist ein unlegierter warmfester Stahl. Die Stahlsorte wird überwiegend im Dampfkessel- und Apparatebau zur Herstellung von Dampferzeugern, Druckbehältern und für Dampf- und Druckrohre eingesetzt [112, S. 1]. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes nach DIN EN 10028-2 [113, S. 7] ist Tabelle 4.8 zu entnehmen.

Tabelle 4.8: Chemische Zusammensetzung Werkstoffnummer 1.0345 gemäß DIN EN 10028-2, nach [113, S. 7]

Massenanteil in %													
C	Si	Mn	P max.	S max.	Al ges.	N	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti- max.	V
≤ 0,16	≤ 0,35	0,60 - 1,20	0,025	0,010	≥ 0,02	≤ 0,012	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,08	≤ 0,030	≤ 0,30	0,03	≤ 0,02

mit: C = Kohlenstoff, Si = Silicium, Mn = Mangan, P = Phosphor, S = Schwefel, Al = Aluminium, N = Stickstoff, Cr = Chrom, Cu = Kupfer, Mo = Molybdän, Nb = Niob, Ni = Nickel, Ti = Titan, V = Vanadium

Die Angaben des Kurznamens sind gemäß Abbildung 4.11 zu verstehen:

P 235 G H

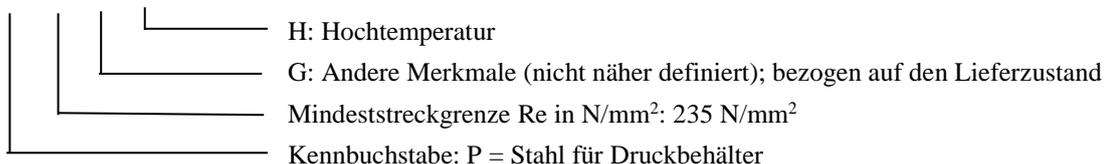


Abbildung 4.11: Bezeichnung warmfester Stähle am Beispiel des Kurznamen P235GH, nach [114, S. 1]

4.3.2 Einbetoniertes Werkstück

Zur Nachbildung von Rohrleitungen, die in Beton verlegt sind, wurde das zu untersuchende Werkstück 5 in ein Hüllrohr gestellt und der Hohlraum zwischen den Rohren mit Beton verfüllt. Diese Ausführung des einbetonierten Werkstückes ist kompatibel mit der Werkstückaufnahme im Versuchsstand und eine verhältnismäßig einfache Handhabung, u.a. für den Werkstückwech-

sel, wird ermöglicht. Tabelle 4.9 gibt die Daten und Abbildung 4.12 die Aufnahmen des einbetonierten Werkstückes wieder. Ausgehend von den aufgeführten Abmessungen hat das Werkstück eine Betondicke von 43,9 mm.

Tabelle 4.9: Daten einbetoniertes Werkstück

Nr.	Kurzname	Werkstoffnummer	Außendurchmesser d_A [mm]	Wanddicke w [mm]	Innendurchmesser d_i [mm]	Ausführung
5	P235GH	1.0345	219,1	6,3	206,5	nahtlos
	S235JR	1.0038	273,0	5,0	263,0	geschweißt



Zu untersuchendes Rohr aus P235GH Hüllrohr aus S235JR

Abbildung 4.12: Einbetoniertes Werkstück für experimentelle Versuchsreihen

Für Werkstück 5 (Rohrlänge 0,5 m) wird der Werkstoff P235GH gewählt, da in kerntechnischen Anlagen i.d.R. keine Rohre aus Edelstahl in Beton verlegt sind. Für das Hüllrohr wurde aus Kostengründen mit S235JR ein gängiger unlegierter Baustahl verwendet. Der Werkstoff und die Ausführung des Hüllrohres ist für die Versuchsdurchführung nicht ausschlaggebend, daher wird das Hüllrohr nicht weiter präzisiert.

Zur Nachbildung eines praxisnahen Werkstückes wird ein Beton mit einer Druckfestigkeitsklasse von C25/30¹⁶ verwendet. Nach einer schriftlichen Auskunft im Jahr 2020 des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB), kommen im Strahlenschutz, je nach Konstruktionsbedingungen, Betone mit Druckfestigkeitsklassen von C25/30 bzw. C30/37 zum Einsatz. Beton, der zum Strahlenschutz u.a. in der Medizin, Werkstoffprüfung und in Kernkraftwerken verwendet wird, heißt Schwerbeton [115, S. 1]. Nach *DIN 1045-4* [116, S. 11] ist hierunter Beton mit einer Trockenrohddichte über 2.600 kg/m³ zu verstehen. Strahlenschutzbeton

¹⁶ Die Bezeichnung der Druckfestigkeitsklasse C25/30 beinhaltet die charakteristische Druckfestigkeit eines Zylinders ($\phi = 150$ mm; $h = 30$ mm) und eines Würfels (Kantenlänge 150 mm) in N/mm² nach 28 Tagen unter Wasser. Der Buchstabe „C“ lässt sich auf das englische Wort „concrete“ (dt.: Beton) zurückführen. [149, S. 1]

dient zur Abschirmung der radioaktiven Strahlung zum Schutz von Menschen und der Umwelt [115, S. 1].

Basierend auf den ausgewählten Werkzeugen und Werkstücken und den damit einhergehenden Randbedingungen, erfolgte die Konstruktion und der Aufbau eines Versuchsstandes zur Rohrintrennung.

4.4 Funktion Versuchsstand

In den folgenden Abschnitten wird der Aufbau und die Funktion des entwickelten Versuchsstandes zur Rohrintrennung mittels Scheibenfräser, Kreissägeblätter und Trennscheiben inklusive der Auswahl der Messtechnik beschrieben. Da Scheibenfräser und Kreissägeblätter für einen deutlich geringeren Drehzahlbereich als Trennscheiben ausgelegt sind, werden für die Versuchsdurchführung zwei unterschiedliche Antriebsmotoren gewählt. Die Funktion und der weitere Aufbau sind identisch. Der Aufbau des Versuchsstandes und die Durchführung der experimentellen Versuchsreihen erfolgte in der Versuchshalle des TMB am KIT.

4.4.1 Aufbau Versuchsstand

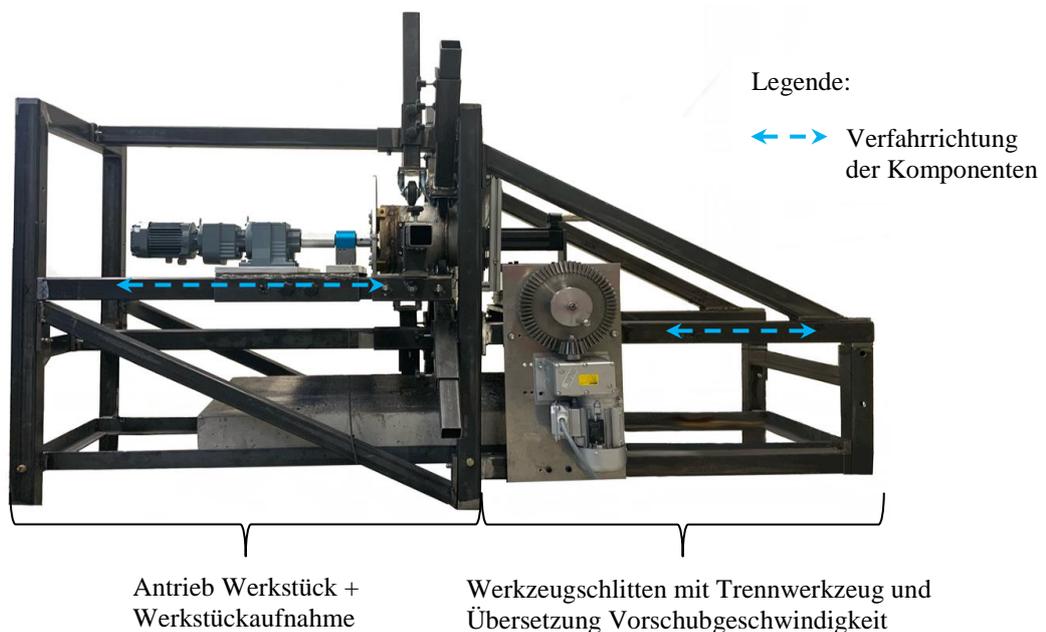


Abbildung 4.13: Seitenansicht Versuchsstand zur Rohrintrennung

In Abbildung 4.13 ist der entwickelte Versuchstand zur Rohrintrennung für Werkstücke im Durchmesserbereich von 100 - 500 mm in der Seitenansicht zu sehen. Auf den linken Seiten befindet sich die Werkstückaufnahme inkl. -antrieb, auf der rechten Seite der Werkzeugschlitten mit Trennwerkzeug inkl. einem Elektromotor und Kegelradgetriebe zur Übersetzung der Vorschubgeschwindigkeit. Die Komponenten lassen sich über die Rechteckprofile der Rahmenkonstruktion bewegen und können gegen ein Verschieben während der Versuchsdurchführung

gesichert werden. Weitere Details sind den Aufnahmen in Abbildung 4.14 und Abbildung 4.15 zu entnehmen.

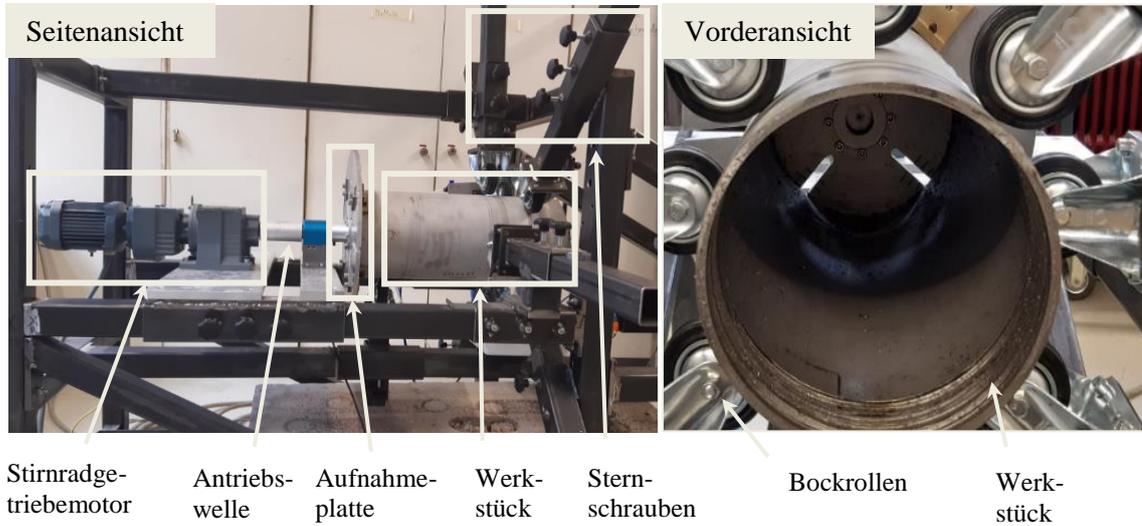


Abbildung 4.14: Detailaufnahmen Versuchsstand - Werkstückaufnahme und Antrieb Werkstücke

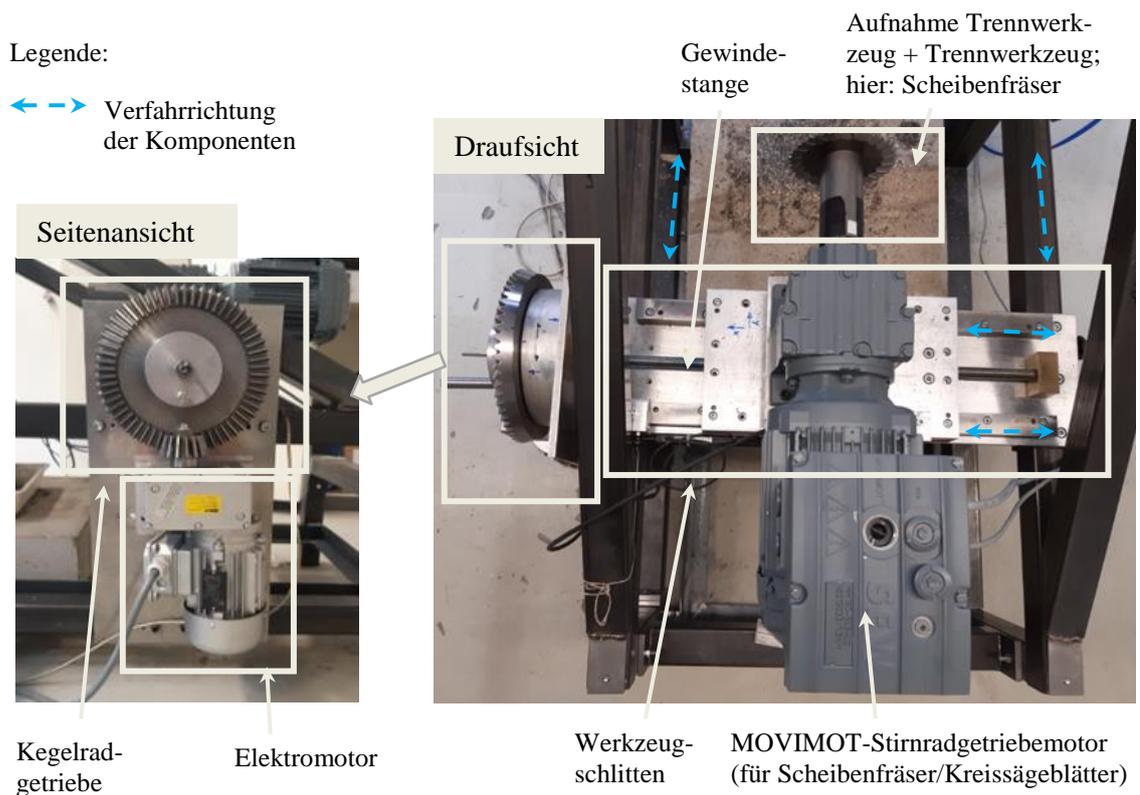


Abbildung 4.15: Detailaufnahmen Versuchsstand - Werkzeugschlitten und Übersetzung Vorschubgeschwindigkeit am Beispiel des Antriebsmotors für Scheibenfräser und Kreissägeblätter

Die Werkstücke werden zur Fixierung am Rohrende (Richtung Stirnradtriebemotor) durch Bolzen an einer Aufnahmeplatte befestigt. Diese wird über eine Welle durch einen Stirnradtriebemotor der Firma SEW Eurodrive mit einer maximalen Drehzahl von $0,25 \text{ min}^{-1}$ angetrieben. Am anderen Rohrende (Richtung Werkzeugschlitten) werden die Werkstücke zur Stabilisation auf Bockrollen gelagert. Letztere sind wiederum an Metallstreben an der Rahmenkonstruktion befestigt und können durch Sternschrauben, dargestellt in Abbildung 4.14, verstellt und angezogen werden. Auf dem Werkzeugschlitten, zu sehen in der Draufsicht in Abbildung 4.15, ist der Antriebsmotor für das Trennwerkzeug angebracht. Die Ansteuerung dieses Motors und die des Stirnradtriebemotors zum Antrieb des Werkstücks wie auch das Ein- und Abschalten der Anlage erfolgt über einen Schaltschrank.

4.4.2 Anordnung von Werkstück, Werkzeug und Maschine

Anhand der schematischen Darstellung der Maschinenparameter in Abbildung 4.16, wird in diesem Abschnitt der Zusammenhang zwischen Werkstück, Werkzeug und Maschine erläutert. Es werden hierfür notwendige Termini definiert und darauf aufbauend die Funktion des Versuchsstandes erklärt.

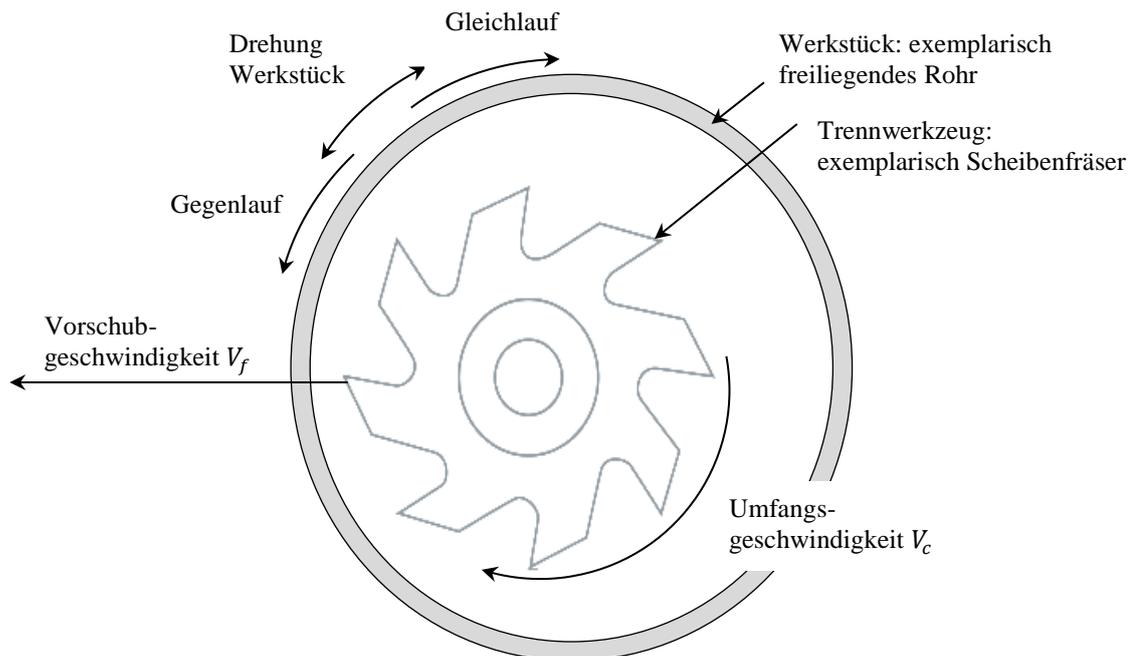


Abbildung 4.16: Schematische Darstellung der Maschinenparameter an Werkstück und Werkzeug

Nach *DIN 6580* [117, S. 3] wird die **Vorschubgeschwindigkeit V_f** ¹⁷ als jene Geschwindigkeit definiert, mit welcher das Werkzeug in das Werkstück eindringt. Im vorliegenden Fall entspricht die Vorschubgeschwindigkeit einer kontinuierlichen Zustellung. Die Spanabnahme wird

¹⁷ Im Rahmen der Datenauswertung wurden bis zu sieben Vorschubgeschwindigkeiten untersucht. Tabelle 4.10 gibt die Abkürzungen und Einheiten der Vorschubgeschwindigkeiten wieder.

durch die Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit bewirkt. Letztere wird auch als Umdrehungs- oder **Umfangsgeschwindigkeit** V_c bezeichnet und berechnet sich aus dem Scheibendurchmesser d des Trennwerkzeuges, der Drehzahl n und der Kreiszahl π zu [118]:

$$V_c = n * d * \pi \quad (1.0)$$

Durch die **Drehzahl** n wird die Anzahl der Umdrehungen eines Werkzeuges pro Zeiteinheit ausgedrückt und ergibt sich aus (1.0) zu:

$$n = V_c / (d * \pi) \quad (1.1)$$

Für rotierende Schleifkörper sind in *DIN EN 12413* [107, S. 59] maximal zulässige Drehzahlen und Umfangsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Scheibendurchmessers angegeben. Hierauf wurde bereits in Kapitel 4.2.2 im Rahmen der Charakterisierung der Trennscheiben eingegangen. Die maximal zulässigen Drehzahlen nach DIN EN 12413 sind in diesem Kapitel in Tabelle 4.5 aufgeführt.

4.4.2.1 Vorschubgeschwindigkeit V_f

Der Werkzeugschlitten ist über eine Gewindestange mit einem Kegelradgetriebe und Elektromotor verbunden, zu vergleichen in Abbildung 4.15 Die Übersetzung der Vorschubgeschwindigkeit erfolgt über diesen Elektromotor und das Kegelradgetriebe auf die Gewindestange. Über eine Handsteuerung sind die Vorschubgeschwindigkeit und die Vorschubrichtung des Werkzeugschlittens stufenlos von 10 - 50 Hertz [Hz] regelbar.



Anzeige Vorschubgeschwindigkeit in [Hz] Not-Aus Potentiometer Vorschubrichtung Werkzeugschlitten links; stopp; rechts

Abbildung 4.17: Detailaufnahmen Versuchsstand - Handsteuerung

Hertz ist dem Internationalen Einheitensystem (SI; frz: *Système international d'unités*) zufolge die Einheit für die Frequenz f . Diese gibt die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde bzw. die Anzahl der sich wiederholenden Vorgänge pro Sekunde in einem periodischen Signal an [119]. Die Frequenz f ist definiert als der Kehrwert der Periodendauer T und berechnet sich zu [120, S. 87]:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.2)$$

Zur Umrechnung der Vorschubgeschwindigkeit von Hertz in Millimeter pro Minute [mm/min], wird durch den am Versuchsstand angebrachten Abstandssensor, nähere Angaben hierzu folgen in Absatz 4.5, der zurückgelegte Weg des Werkzeugschlittens pro Minute gemessen. Tabelle 4.10 gibt die Vorschubgeschwindigkeit in [Hz] bzw. [mm/min] und Abbildung 4.18 den sich hieraus ergebenden annähernd linearen Verlauf der Vorschubgeschwindigkeit wieder. Bei der Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung werden die Abkürzungen V_{f0} bis V_{f6} [-] verwendet. Anhand nachfolgender Tabelle ist eine Zuordnung zu den Einheiten [Hz] und [mm/min] möglich.

Tabelle 4.10: Umrechnung Vorschubgeschwindigkeit

Vorschubgeschwindigkeit [-]	Vorschubgeschwindigkeit [Hz]	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]
V_{f0}	10	0,057
V_{f1}	15	0,105
V_{f2}	25	0,158
V_{f3}	32,5	0,199
V_{f4}	40	0,248
V_{f5}	45	0,275
V_{f6}	50	0,302

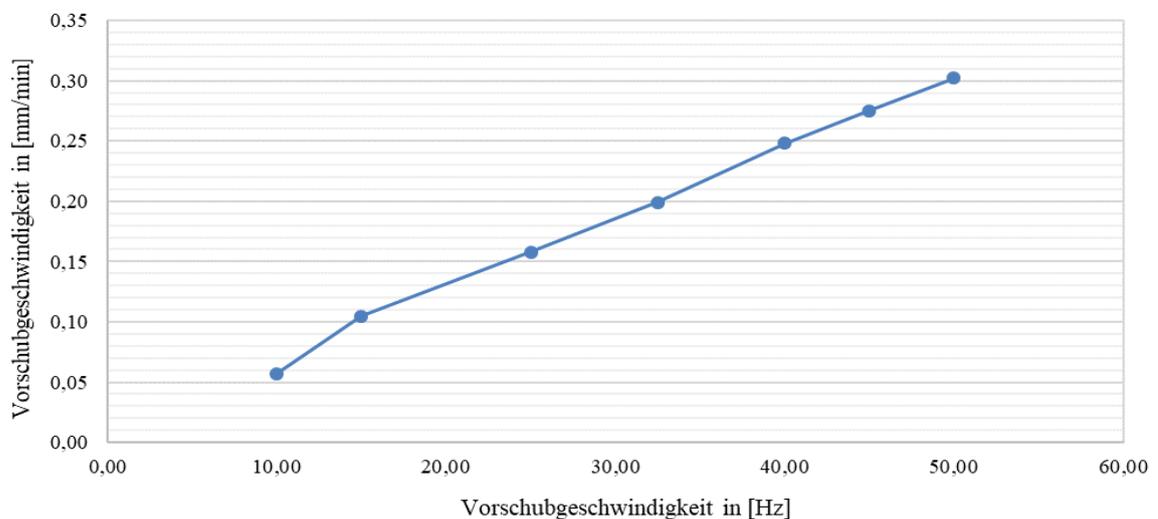


Abbildung 4.18: Verlauf Vorschubgeschwindigkeit

4.4.2.2 Umfangsgeschwindigkeit V_c

Die Umfangsgeschwindigkeit ist nach Formel (1.0) neben dem Scheibendurchmesser des Trennwerkzeuges von der Drehzahl abhängig. Für die Ansteuerung des Scheibenfräasers und der Kreissägebblätter wird ein MOVIMOT-Stirnradgetriebemotor, dessen Drehzahlen (Abtriebsdrehzahlen) stufenlos von $30 - 454 \text{ min}^{-1}$ regelbar sind, der Firma SEW Eurodrive verwendet. Auf

der Oberseite des MOVIMOT-Stirnradtriebemotors befinden sich zehn Schalterstellungen, anhand derer die Drehzahl eingestellt werden kann. Tabelle 4.11 gibt eine Zuordnung der Schalterstellungen zur Drehzahl wieder. Das zugehörige Diagramm in Abbildung 4.19 zeigt einen annähernd linearen Verlauf der Schalterstellungen zur Drehzahl.

Mithilfe eines Laser-Fototachometers, Modell RPM10 des Herstellers EXTECH INSTRUMENTS, kann die Drehzahl des MOVIMOT-Stirnradtriebemotors und damit die Antriebsdrehzahl des Scheibenfräasers und der Kreissägeblätter eingestellt werden. Durch das Messgerät kann die Drehzahl optisch durch einen Laser mit einer Genauigkeit von $\pm 0,05\%$ bestimmt werden [121, S. 7].

Tabelle 4.11: Schalterstellung und Drehzahl MOVIMOT Stirnradtriebemotor

Schalterstellung MOVIMOT	Abtriebsdrehzahl n [min^{-1}]
1	30
2	74
3	124
4	174
5	230
6	275
7	330
8	380
9	435
10	454

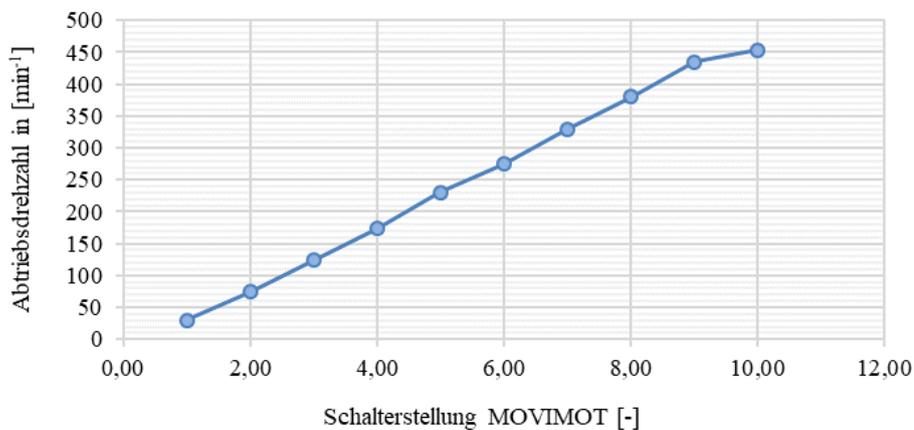


Abbildung 4.19: links: Zuordnung Schalterstellung MOVIMOT Stirnradtriebemotor zur Abtriebsdrehzahl; rechts: Laser-Fototachometer Modell RPM10 [122]

In der Einführung des Kapitels wurde bereits angemerkt, dass Trennscheiben mit deutlich höheren Drehzahlen als Scheibenfräser und Kreissägeblätter angetrieben werden. Der MOVIMOT-Stirnradtriebemotor mit einer maximalen Drehzahl von 454 min^{-1} ist nicht geeignet zum Antrieb von Trennscheiben. Für die experimentellen Versuchsreihen mit Trennscheiben kann der MOVIMOT-Stirnradtriebemotor durch einen Synchronmotor derselben Firma ausgetauscht werden. Die Drehzahlen des Synchronmotors lassen sich stufenlos bis 6.000 min^{-1} einstellen.

Nach *DIN EN 12413* [107, S. 59], zu vergleichen in Tabelle 4.5, dürfen Schleifwerkzeuge mit einem Scheibendurchmesser von 125 mm und einer maximalen Umfangsgeschwindigkeit von 80 m/s mit einer Drehzahl von bis zu 12.250 min^{-1} betrieben werden. Die Herstellangaben für alle drei ausgewählten Trennscheiben mit Scheibendurchmesser 125 mm belaufen sich daher auf eine maximal zulässige Drehzahl von 12.200 min^{-1} . Der ausgewählte Synchronmotor zum Antrieb der Trennscheiben ist jedoch nur für Drehzahlen für bis zu 6.000 min^{-1} ausgelegt. Dies ist damit zu begründen, dass Voruntersuchungen mit einem Geradschleifer, welcher einen Drehzahlbereich von 8.500 - 28.000 min^{-1} hat, zur Rohrinnentrennung mittels Schleifscheiben durchgeführt wurden. Abbildung 4.20 zeigt links den Geradschleifer während der Versuchsdurchführung zur Rohrinnentrennung am Versuchsstand und rechts den ausgewählten Geradschleifer, Modell GSZ8-280 PE, des Herstellers C. & E. Fein GmbH. Erste Testreihen mit der zulässigen Drehzahl von 12.000 min^{-1} wie auch mit einer auf 8.500 min^{-1} reduzierten Drehzahl mit variierenden Vorschubgeschwindigkeiten haben gezeigt, dass es zu einer hohen Wärmeentwicklung am Geradschleifer kommt und dieser sich aus Sicherheitsgründen vor einer Überhitzung ausschaltet. Im vorliegenden Anwendungsfall werden daher nicht die maximal zulässigen Drehzahlen von bis zu 12.200 min^{-1} untersucht.

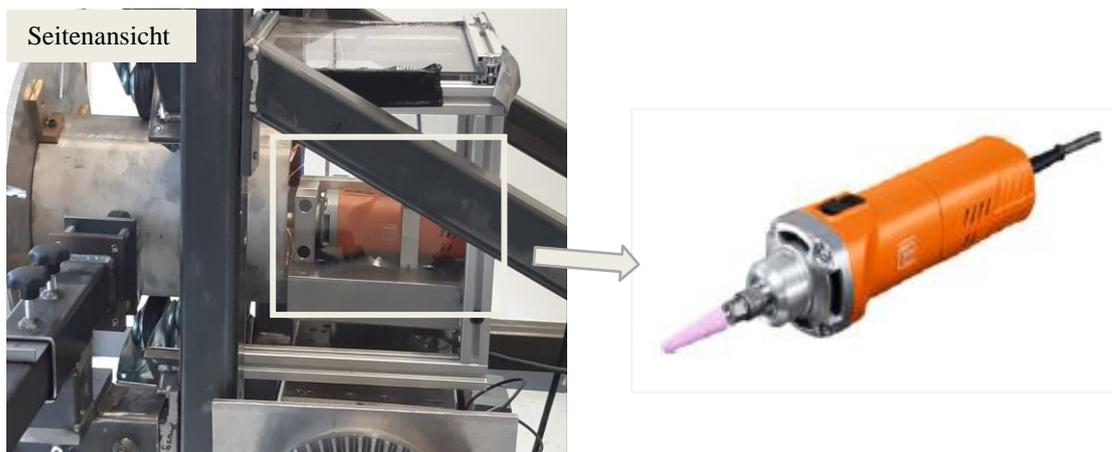


Abbildung 4.20: links: Antrieb Trennscheiben mittels Geradschleifer; rechts: Detailansicht Geradschleifer [123]

Der verwendete Synchronmotor für die Versuchsdurchführung mittels Trennscheiben ist in Abbildung 4.21 zu sehen. Die vorangegangenen Beschreibungen zum Aufbau und Funktion des Versuchsstandes für Scheibenfräser und Kreissägeblätter gelten auch für Trennscheiben. Wegen des Funkenflugs während der Rohrinnentrennung mit Trennscheiben, ist aus Sicherheitsgründen zusätzlich eine Makrolon-Einhausung um den Synchronmotor angebracht. Zudem ist zur Aufzeichnung der Staubpartikelkonzentrationen während des Trennvorgangs mittels Trennscheiben in der Einhausung eine Öffnung zur Anbringung einer Probenahmesonde vorgesehen. Nähere Details hierzu folgen in Absatz 4.5.4.

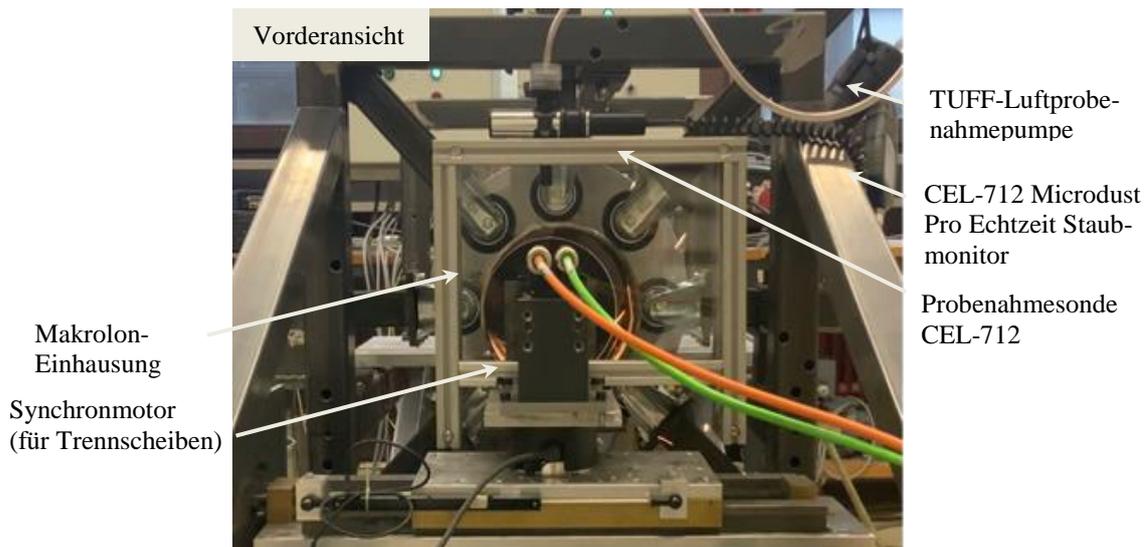


Abbildung 4.21: Detailaufnahmen Versuchsstand - Rohrinnentrennung mittels Trennscheiben

4.4.2.3 Drehung Werkstück

Während der Versuchsdurchführung wird das Werkstück mit einer Drehzahl von $0,25 \text{ min}^{-1}$ gedreht. Auf diese Weise kann ein Schnitt über den gesamten Rohrumfang erzeugt werden. Für den Nachweis der Praxistauglichkeit des entwickelten Rohrinnentrennsystems kann das Rohr fixiert werden, sodass die Gegebenheiten in Einbaulage simuliert werden können. Sofern die Werkzeugdrehrichtung und die Drehrichtung des Werkstückes einander entgegengerichtet sind, ist in Anlehnung an *DIN 8632-1* [57, S. 9] der Terminus Gegenlaufbetrieb zu verwenden. Bei gleichgerichteter Drehrichtung von Werkstück und Werkzeug handelt es sich folglich um Gleichlaufbetrieb. Wird in der Versuchsplanung bzw. Ergebnisauswertung die Drehrichtung nicht explizit erwähnt, so ist von Gegenlauf auszugehen.

4.5 Messtechnik und Methodik zur Zielgrößenbestimmung

Um die im Parameter-Diagramm in Abbildung 4.1 definierten Qualitätsmerkmale bzw. Zielgrößen bei der Rohrinnentrennung ermitteln zu können, wird die in Tabelle 4.12 genannte Messtechnik verwendet. Neben einer genauen Herstellerbezeichnung und Modell, wird je Zielgröße die Einheit, die Auflösung und die Genauigkeit der verwendeten Messtechnik aufgeführt. Es handelt sich um Herstellerangaben. Auf die Hersteller wird explizit mit zugehöriger Quelle in den nachfolgenden Absätzen bei der Vorstellung der Methodik einschließlich der verwendeten Messtechnik verwiesen.

Tabelle 4.12: Messtechnik für experimentelle Untersuchungen, nach [9, S. 55]

Zielgröße	Einheit	Messtechnik	Auflösung	Genauigkeit
Schnittkraft	[N]	6-Achsen-Kraft-Momentensensor, Typ K6D110	F_x, F_y : 8 kN F_z : 20 kN M_x, M_y, M_z : 500 Nm*	0,2 %*
Volumenabtrag	[mm ³]	Laser-Profil-Scanner, Modell scanCONTROL 2910-25	1.280 Punkte/Profile*	± 0,008 %* (Linie-Linearität)
Wärmeentwicklung an Werkzeugschneide	[°C]	Wärmebildkamera, Modell testo 872s	320 x 240 Pixel*	± 2 °C*
Massenverlust (bei Trennscheiben)	[g]	Präzisionswaage, Modell Excellence XS603S	bis 610 g*	0,5 mg*
Staubkonzentration (bei Trennscheiben)	[mg/m ³]	CEL-712 Microdust Pro Echtzeit-Staubmonitor	0,001 - 2,5 mg/m ³ *	< 2 µg / m ³ / °C (Nullstabilität) < 0,2 % / m ³ / °C (Spannenstabilität)*

* Herstellerangaben

4.5.1 Methodik Schnittkraft

Zur Aufzeichnung der auftretenden Kräfte und Momente während der experimentellen Versuche ist unter dem Antriebsmotor für die Trennwerkzeuge ein 6-Achsen-Kraft-Momentensensor (Typ K6D110) installiert. Der Mehrkomponentensensor besteht nach Angaben des Herstellers *ME-Meßsysteme GmbH* [124] aus „sechs unabhängigen Kraftsensoren, die mit Dehnungsmessstreifen-Vollbrücken ausgerüstet sind. Aus den sechs Sensorsignalen werden durch eine Berechnungsvorschrift die Kräfte in drei Achsen des Raumes sowie die drei Momente um diese drei Achsen berechnet.“ Der Sensor ist über einen 4-Kanal DMS-Verstärker (GSV-8DS) mit dem Programm „GSV-multi“ verbunden, in welchem die generierten Daten während der Versuchsdurchführung angezeigt und gespeichert werden. Eine vereinfachte Darstellung der Datenübertragung des Messsystems gibt Abbildung 4.22 wieder. Die Nennkraft des Sensors in x- und y-Achse beträgt 8 kN bzw. in z-Achse 20 kN, das Nennmoment für alle drei Achsen beträgt 500 Nm. Die Genauigkeit des Sensors liegt bei 0,2 %. [125]

**Abbildung 4.22:** Datenübertragung 6-Achsen-Kraft-Momentensensor (Typ K6D110), nach [125]

In Abbildung 4.23 ist der Sensor beispielhaft unter dem MOVIMOT-Stirnradtriebemotor für Scheibenfräser und Kreissägeblätter zu sehen. Die Anbringung unter dem Synchronmotor für Trennscheiben ist identisch.

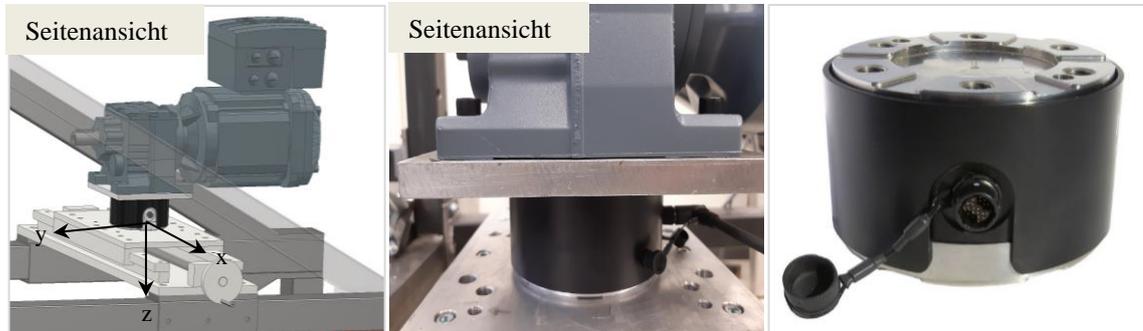


Abbildung 4.23: links: Schematische Darstellung der Position des Kraft-Momentensensors; mittig: Detailaufnahme Sensor unter MOVIMOT-Stirnradtriebemotor; rechts: Kraftmessdose K6D110 [125]

Durch den Sensor wird die Zielgröße Schnittkraft untersucht. Gemäß dem eingezeichneten Koordinatensystem in Abbildung 4.23, ist während der Rohrinnentrennung die Kraft in Schnittrichtung, d.h. die Kraft in x-Richtung, ausschlaggebend. Im Rahmen der Datenauswertung wird daher nur die Schnittkraft F_x für die Trennwerkzeuge Scheibenfräser, Kreissägeblätter und Trennscheiben untersucht. Die Kräfte in x-Richtung sind ausschlagend für die Wahl der Betriebsparameter. In Anhang B-1 ist ein Nachweis darüber zu finden, dass der Hebelarm von der Kraftmessdose, die sich unter dem Antriebsmotor der Trennwerkzeuge befindet, zu den auftretenden Kräften in x-, y- und z-Richtung am Schneidkopf keinen Einfluss hat. Folglich können direkt die durch die Kraftmessdose aufgezeichneten Kräfte ausgewertet werden.

Für die Analyse der Schnittkräfte werden die durchschnittlichen und die maximal auftretenden Kräfte in x-Richtung je Versuch untersucht. In Abbildung 4.24 ist exemplarisch die Datenaufnahme für V19 mit TS2 (A) an Werkstück 1 zu sehen. Hierin sind die Durchschnitts- und Maximalkraft in x-Richtung markiert. Es wird ersichtlich, dass mit zunehmender Versuchsdauer, d.h. mit zunehmender Schnitttiefe, die Schnittkraft ansteigt. Dies ist bei allen Trennwerkzeugen zu beobachten.

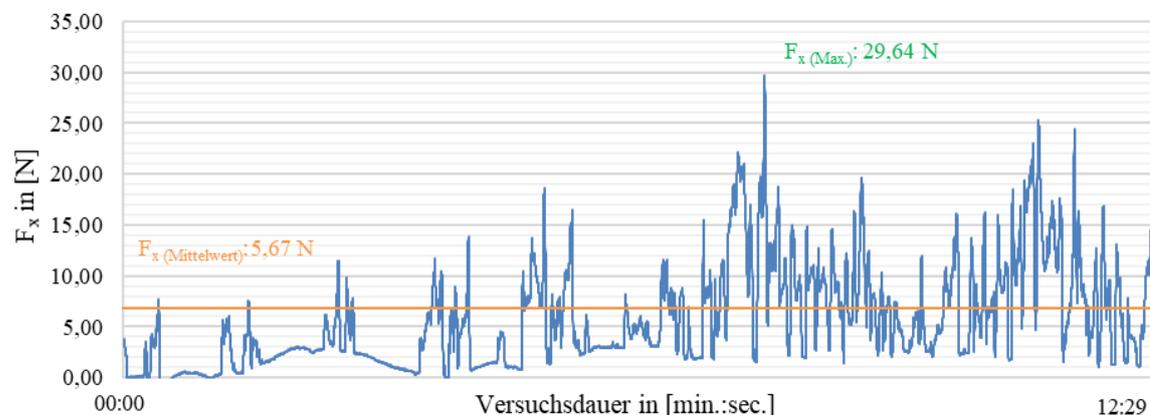


Abbildung 4.24: Beispiel Datenaufnahme V19, TS2 (A) an Werkstück 1

4.5.2 Methodik Volumenabtrag

Der Volumenabtrag wird als Zielgröße in den Versuchsreihen untersucht, um die Schnittgüte der einzelnen Trennwerkzeuge untereinander und an unterschiedlichen Werkstücken vergleichen zu können. Dies ist ein Grund, warum in den Versuchsreihen das Werkstück nur auf eine gewisse Restwandstärke getrennt und der Rohrinnschnitt nicht über die gesamte Wandstärke vollzogen wird. Dazu kommt, dass freiliegende Rohrleitungen in kerntechnischen Anlagen, aufgrund der Gefahr einer Kontaminationsverschleppung, nur bis zu einer bestimmten Restwanddicke getrennt werden sollten.

Zur Untersuchung des Volumenabtrages wird ein Laser-Profil-Scanner, Modell scanCONTROL 2910-25, des Herstellers Micro Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG verwendet. Der Sensor funktioniert durch optische Triangulation, d.h. durch Abstandsmessung mittels Winkelberechnung. Auf eine Messobjektoberfläche wird eine Laserlinie projiziert und in Abhängigkeit der Entfernung wird das reflektierte Licht der Laserlinie unter einem bestimmten Winkel auf der Sensor-Matrix abgebildet und zweidimensional ausgewertet. Es wird nicht nur die Abstandsinformation, sondern auch die genaue Position jedes Punktes auf der Laserlinie ermittelt und ausgegeben. [126, S. 15]

Der Sensor mit integriertem Controller ist mit einem Halbleiterlaser der Wellenlänge 658 nm (sichtbar/rot) und Laserklasse 2M ausgestattet. [126, S. 10] In Abbildung 4.25 ist der Laser-Profil-Scanner wie auch dessen Anbringung an der Rahmenkonstruktion des Versuchsstandes über einen magnetischen Gelenkarm dargestellt. Während eines Messvorganges kann das Werkstück über den Antriebsmotor für das Rohr rotiert werden. Da die Zeit für eine Rohrumdrehung bekannt ist, kann die Zeit nach genau einer Umdrehung gestoppt werden. Eine doppelte Aufzeichnung der Messdaten wird vermieden.

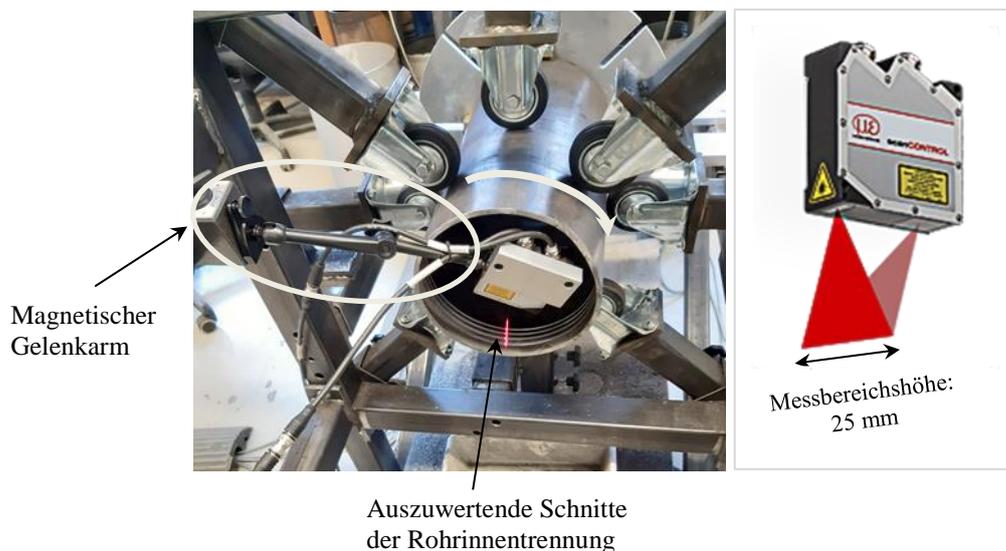


Abbildung 4.25: links: Messung mittels Laser-Profil-Scanner am Versuchsstand; rechts: Laser-Profil-Scanner Modell 2910-25 [126, S. 1]

Pro Messvorgang werden durch den Sensor ca. 3.500 zweidimensionale Linienprofile aufgenommen und in einer AVI-Datei gespeichert. Die Auswertung der generierten Daten wird mit

der Software „scanCONTROL Configuration Tools“ des Herstellers Micro Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG durchgeführt. Nach dem Laden der Linienprofile in die Software kann zwischen einem oder mehreren Programmen wie z.B. zur Bestimmung von Extrema, Winkeln, Kanten/Stufen oder Vertiefungen gewählt werden. Im vorliegenden Fall wird das Programm „Vertiefung - Fläche“ gewählt. In Abbildung 4.26 sind beispielhaft V43 und V44 mit Trennscheiben im entsprechenden Programm dargestellt. Auf der Abszisse wird die Messbereichshöhe in x-Richtung und auf der Ordinate die erzeugte Schnitttiefe in z-Richtung, jeweils in der Einheit mm, angegeben. Im nächsten Bearbeitungsschritt ist die zu bestimmende Fläche für jeden Versuch (hier: V44) einzugrenzen.

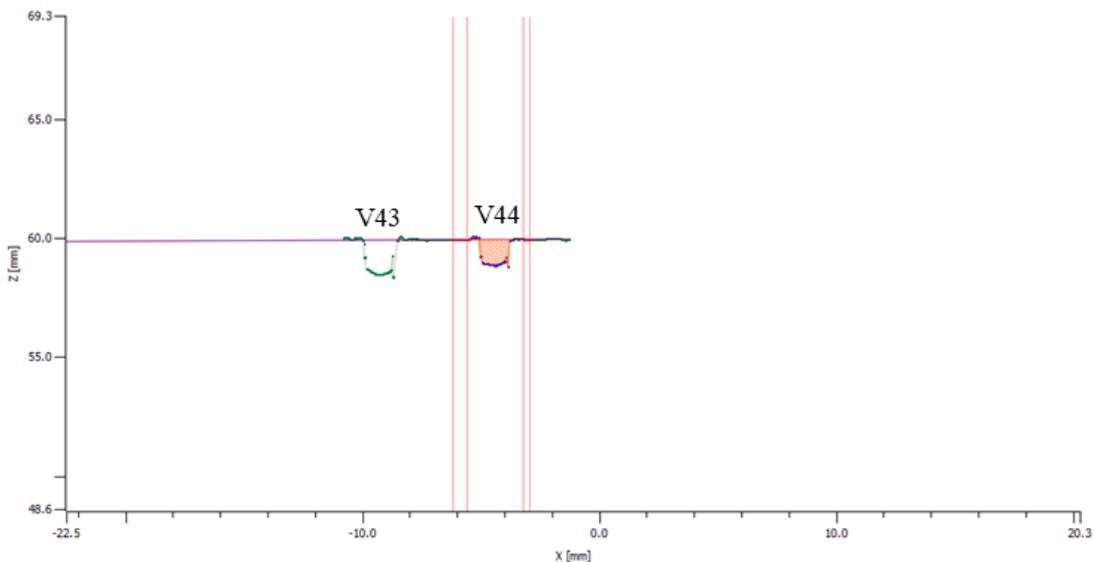


Abbildung 4.26: Eingrenzung der Fläche für V44 in Software „scanCONTROL Configuration Tools“

Die abgetragene Fläche wird anschließend durch das Rechteckverfahren mittels numerischer Integration durch die Software „scanCONTROL Configuration Tools“ approximiert und in einer CSV-Datei ausgegeben. In Abbildung 4.27 ist exemplarisch die Anwendung der Rechteckregel auf einen Laser-Profil-Scan, anhand eines Beispiels aus der Literatur, zu sehen.

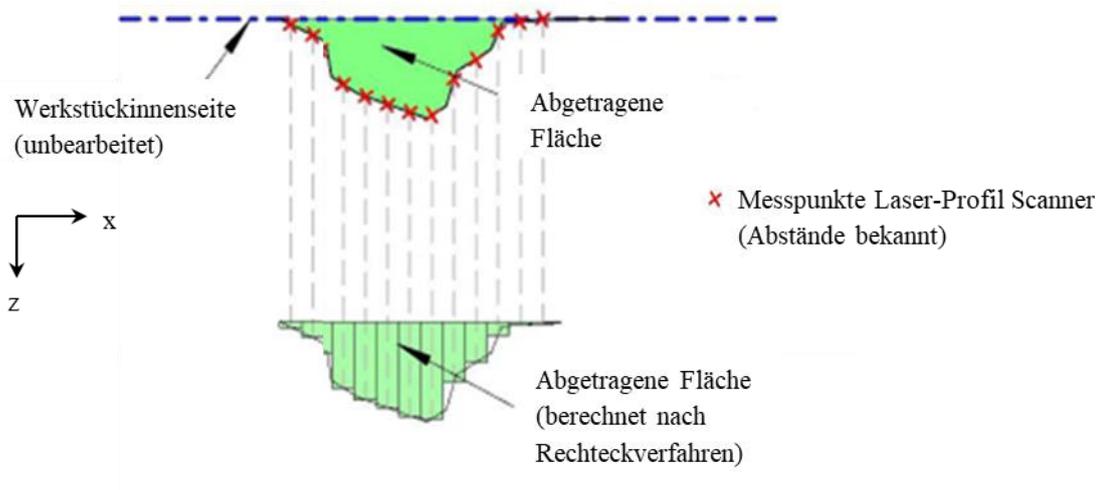


Abbildung 4.27: Anwendung der Rechteckregel auf einen Laser-Profil-Scan, nach Metzger [127, S. 34]

Durch die Rotation des Werkstückes während des Messvorganges kann durch die Aufnahme von ca. 3.500 zweidimensionalen Linienprofilen eine dreidimensionale Darstellung der Oberfläche erzeugt und damit das Volumen berechnet werden. In Abbildung 4.28 sind V43 und V44 über die Anzahl der Profile (x-Achse) über die Messbereichshöhe des Laser-Profil-Scanners (y-Achse) dargestellt.

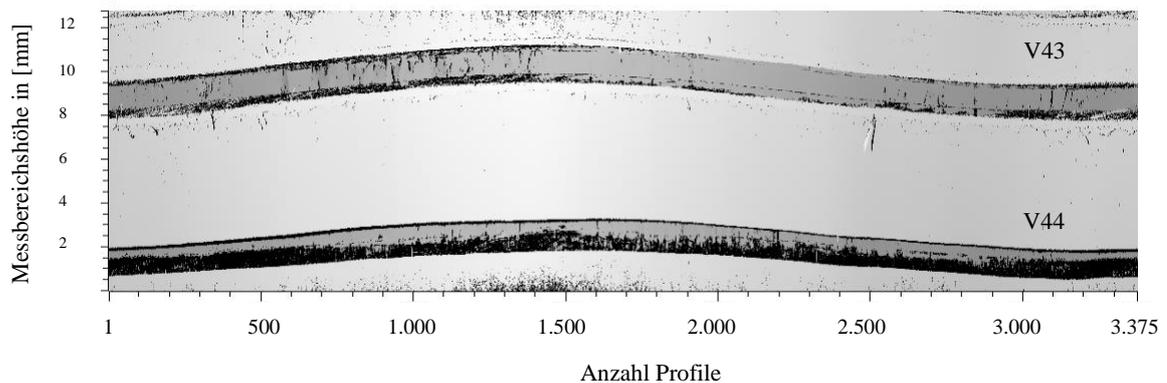


Abbildung 4.28: Darstellung V43 und V44 über die Anzahl der Profile

Zur Visualisierung des erzeugten Volumenabtrages bzw. der Schnitttiefe im Raum wird zusätzlich die Software „scanCONTROL 3D-View“ benutzt. Die durch den Laser-Profil-Scanner aufgenommenen Dateien können in die genannte Software importiert und darin bearbeitet werden. Beispiele hierzu sind in der Datenauswertung von Trennscheiben in Abbildung 5.13 zu sehen.

Bei der Auswertung des Volumenabtrages muss berücksichtigt werden, dass die verwendeten Trennwerkzeuge teilweise eine variierende Scheibenbreite aufweisen. Hierauf wird an den entsprechenden Stellen verwiesen und die Scheibenbreite bei einem Vergleich des Volumenabtrages der einzelnen Werkzeuge berücksichtigt. Herstellerbedingt war es nicht möglich, alle Trennwerkzeuge in derselben Scheibenbreite zu beschaffen.

Wie eingangs erwähnt, werden die freiliegenden Werkstücke in den experimentellen Versuchsreihen nicht vollständig durchtrennt, sondern nur auf eine gewisse Restwanddicke geschwächt. Hintergrund hierfür ist einerseits, dass bei freiliegenden Rohren eine Kontaminationsverschleppung in kerntechnischen Anlagen vermieden werden muss. Folglich sollte das zu entwickelnde Rohrintrennsystem zur Verhinderung einer Kontaminationsverschleppung freiliegende Rohre nur auf eine gewisse Restwanddicke trennen. Anschließend kann das Rohr, beispielsweise durch Abscheren, vollständig getrennt werden. Andererseits soll in den Versuchsreihen die Abtragsleistung der einzelnen Trennwerkzeuge untereinander wie auch an den unterschiedlichen Werkstücken in Form des Volumenabtrages in $[\text{mm}^3]$ analysiert werden. Dies ist nur möglich, wenn die Werkstücke auf eine gewisse Restwanddicke getrennt werden. Daher ist am Werkzeugschlitten ein Abstands-/Wegsensor, zu sehen in Abbildung 4.29, angebracht. Durch den Abstandssensor kann bestimmt werden, wann ein definierter Weg zurückgelegt wurde. Grundsätzlich misst ein Abstands-/Wegsensor die Längenänderung bzw. die Distanz zwischen einem Messobjekt und einem Bezugspunkt. Die Distanz zu einem Bezugspunkt wird in ein

Einheitssignal umgewandelt und im vorliegenden Versuchsaufbau über eine Spannungsmessanzeige ausgegeben. [128]

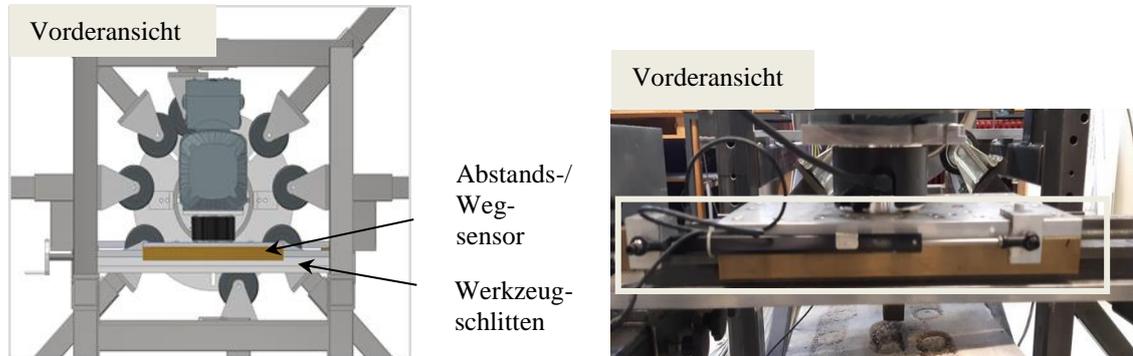


Abbildung 4.29: links: Schematische Darstellung der Position des Wegsensors; rechts: Detailaufnahme Wegsensor

In Abbildung 4.30 ist der zu messende Weg je Versuch durch den Wegsensor in Rot dargestellt. Sobald das Trennwerkzeug Kontakt mit der Werkstückinnenseite hat, wird der Versuch gestartet und nach Zurücklegen des definierten Weges gestoppt. Neben der Zielgrößenbestimmung Volumenabtrag kann durch den Abstandssensor die Reproduzier- und Vergleichbarkeit der Ergebnisse sichergestellt werden.

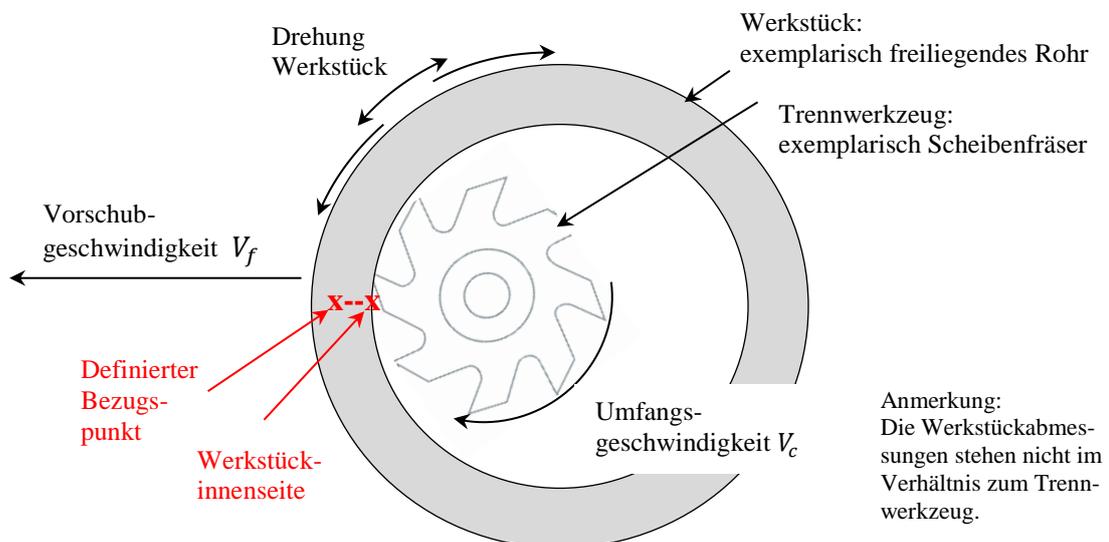


Abbildung 4.30: Schematische Darstellung des zu messenden, definierten Weges durch Wegsensor

Bei in Beton verlegten Rohrleitungen kann aufgrund der Abschirmung durch die umgebende Betonstruktur das Rohr durch das Rohrintrennsystem vollständig getrennt werden. Innerhalb der Versuchsreihe mit Werkstück 5 (einbetoniertes Werkstück) wird dieses daher vollständig getrennt. Auch in den Validierungsversuchen mit dem entwickelten Prototyp zur Rohrintrennung werden die Werkstücke vollständig getrennt, um die Funktion des Prototyps mit den gewählten Betriebsparametern nachweisen zu können.

4.5.3 Methodik Massenverlust und Wärmeentwicklung

Durch die Analyse des Massenverlustes¹⁸ in Kombination mit der Wärmeentwicklung ist eine Bewertung des Werkzeugverschleißes und damit auch die der Standzeit des verwendeten Trennwerkzeuges möglich. *Dietrich und Richter* [87, S. 25] bezeichnen die Standzeit T als jene „Zeit in Minuten, in der die Schneide, unter dem Einfluss der Zerspanungsvorgänge, bis zur festgelegten Verschleißgröße arbeitsfähig bleibt.“ Einen wesentlichen Einfluss auf die Standzeit der Werkzeugschneide hat nach *Paucksch et al.* [129, S. 31] „die Temperatur an der Schneide, die sich nach Beginn des Zerspanens als Gleichgewichtszustand zwischen der beim Zerspanen entstehenden und der abgeführten Wärme einstellt.“

Zur Ermittlung des Massenverlustes wird das Gewicht der Trennscheibe vor und nach Versuchsdurchführung dokumentiert. Als Messsystem dient eine Präzisionswaage der Mettler-Toledo GmbH, Modell Excellence XS603S, mit einer Genauigkeit von 0,5 mg [130, S. 25]. Die Temperatur an der Werkzeugschneide wird durch eine Wärmebildkamera der Testo SE & Co. KGaA, Modell testo 872s, gemessen. Die Wärmebildkamera hat eine Messgenauigkeit von ± 2 °C [131, S. 3]. Die aufgeführte Messtechnik zur Analyse der Standzeit sind in Abbildung 4.31 dargestellt.



Abbildung 4.31: links: Präzisionswaage, Modell Excellence XS603S [132]; rechts: Wärmebildkamera, Modell testo 872s [131, S. 1]

Die Analyse der Temperaturentwicklung wird mit der zugehörigen Software „testo IRSoft“ durchgeführt. Hierfür wird unmittelbar nach jedem Versuch ein Wärmebild des Trennwerkzeuges aufgenommen und die Maximaltemperatur an der Trennscheibe mit der Funktion „Hotspot (HS)“ ermittelt.¹⁹ Im Rahmen der Datenauswertung sind beispielweise in Abbildung 5.22 und Abbildung 5.23 Wärmebildaufnahmen mit der Kennzeichnung eines Hotspots zu sehen.

¹⁸ Der Massenverlust kann nur bei Trennscheiben aufgenommen werden. Bei Scheibenfräsern und Kreissägeblättern ist der Massenverlust zu gering und nicht aussagekräftig.

¹⁹ Zur Aufnahme des Wärmebildes muss der Werkzeugschlitten nach Versuchsende aus dem Werkstück gefahren werden. D.h. die Wärmebilder werden mit einer minimalen zeitlichen Verzögerung nach Versuchsende aufgenommen.

4.5.4 Methodik Staubkonzentration

Die bei der Rohrintrennung freiwerdenden Staubkonzentrationen spielen aus Gründen der Arbeitssicherheit in kerntechnischen Anlagen eine wesentliche Rolle. Auch wenn Rohrleitungen vor einer Demontage gespült werden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass alle radioaktiven Ablagerungen an der Rohrintenseite entfernt werden konnten. Während der Rohrintrennung können die Ablagerungen demnach über die sich bildenden Staubkonzentrationen freigesetzt und im Raum verteilt werden.

Gemäß der *Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 900* [133, S. 2], ist Staub eine „disperse Verteilung fester Stoffe in der Luft, entstanden durch mechanische Prozesse oder durch Aufwirbelung.“ Grenzwerte für Schwebstoffe, hierzu zählen neben Staub auch Rauch und Nebel, werden in der TRGS 900 in der Einheit mg/m^3 für die am Arbeitsplatz vorherrschenden Betriebsbedingungen aufgeführt. Unterschieden wird zwischen Arbeitsplatzgrenzwerten (AGW) für die alveolengängige Staubfraktion (A-Fraktion) und für die einatembare Staubfraktion (E-Fraktion). Der AGW für die A-Fraktion beträgt $1,25 \text{ mg}/\text{m}^3$ und für die E-Fraktion $10 \text{ mg}/\text{m}^3$. Zusammengefasst werden die AGWe für beide Fraktionen als Allgemeiner Staubgrenzwert (ASGW). Durch den ASGW sollen Schäden an den Atmungsorganen, die durch eine allgemeine Staubwirkung entstehen können, vermieden werden. [133, S. 4-5]

Allerdings gelten diese Grenzwerte nur für Stoffe, für welche kein stoffspezifischer AGW aufgestellt wurde. Stoffbeispiele, für welchen der ASGW anzuwenden ist, sind u.a. Aluminiumoxid, Kohlestaub und Siliciumcarbid. [133, S. 6] D.h. Trennscheiben aus beispielsweise Korund und Diamant fallen unter den ASGW. Da jedoch Werkstücke aus vorwiegend Chrom-Nickel-Edelstahl getrennt werden und diese unter die Tätigkeiten mit krebserzeugenden Metallen fallen, muss zusätzlich die TRGS 561 angewandt werden. Laut der *TRGS 561* [134, S. 7] ergibt sich für Chromverbindungen ein Grenzwert von $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die einatembare Fraktion und für Nickelverbindungen ein Grenzwert von $6,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die alveolengängige Fraktion. Im vorliegenden Fall der Rohrintrennung ist demnach der Grenzwert für Chromverbindungen entscheidend.

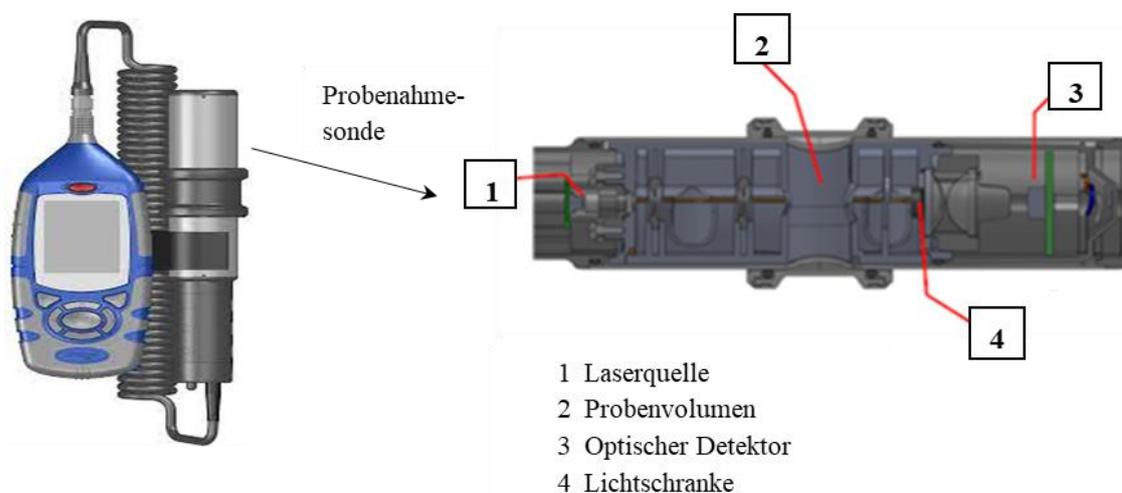


Abbildung 4.32: links: CEL-712 Microdust Pro Echtzeit-Staubmonitor [135, S. 8]; rechts: Probenahme-sonde, nach [135, S. 9]

Die Staubmessung bei der Rohrrinnenrennung mittels Trennscheiben wird durch den in Abbildung 4.32 dargestellten CEL-712 Microdust Pro Echtzeit-Staubmonitor des Herstellers CASELLA CEL Inc. aufgezeichnet. Das Messgerät misst in Echtzeit die Partikelkonzentrationen von u.a. Staub in der Einheit mg/m^3 [135, S. 4]. Für die Datenauswertung werden die Maximal- und die Durchschnittswerte der ermittelten Staubkonzentration je Versuch betrachtet.

Das Messgerät funktioniert mittels einer regulierten Laserlichtquelle, die Licht über eine Messkammer in Richtung eines optischen Detektors sendet. Wenn die Luft sauber ist, wird das Licht durch eine Lichtschranke daran gehindert, auf direktem Weg den Laserdetektor zu erreichen. Sind dahingegen Staubpartikel im Probenvolumen, hat dies zur Folge, dass das Laserlicht innerhalb eines engen Winkels zerstreut wird. Ein Teil des Lichts trifft so auf indirektem Weg auf den Detektor. [135, S. 9]

Zur Messung der Partikelkonzentration während der Versuchsdurchführung, ist in der Makrolon-Einhausung, zu vergleichen in Abbildung 4.33, eine Öffnung für die Probenahmesonde über dem zu trennenden Rohrsegment angebracht. Für eine optimale Genauigkeit des Messgerätes ist vor jeder Echtzeitmessung eine „Nullpunkt-“ und „Spanne“-Prüfung durchzuführen. Unter Spanne ist die Einstellung einer bekannten Instrumentenempfindlichkeit durch einen optischen Kalibriereinsatz zu verstehen. [135, S. 27]

Für die Ansaugung wird eine TUFF-Luftprobenahmepumpe desselben Herstellers verwendet. Die Pumpe erzeugt einen kontinuierlichen Luftstrom von 2 l/min in der Probenahmekammer. Durch die Sicherstellung eines gleichmäßigen Luftdurchsatzes durch die Probenahmesonde können Fehler, die beispielsweise durch die Orientierung des Sondeneinlasses entstehen, reduziert werden [135, S. 46].

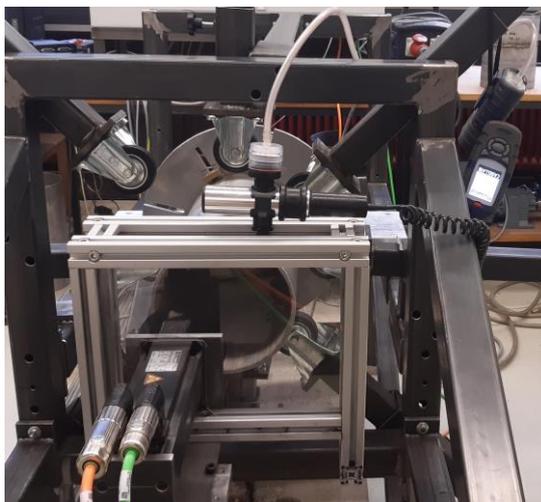
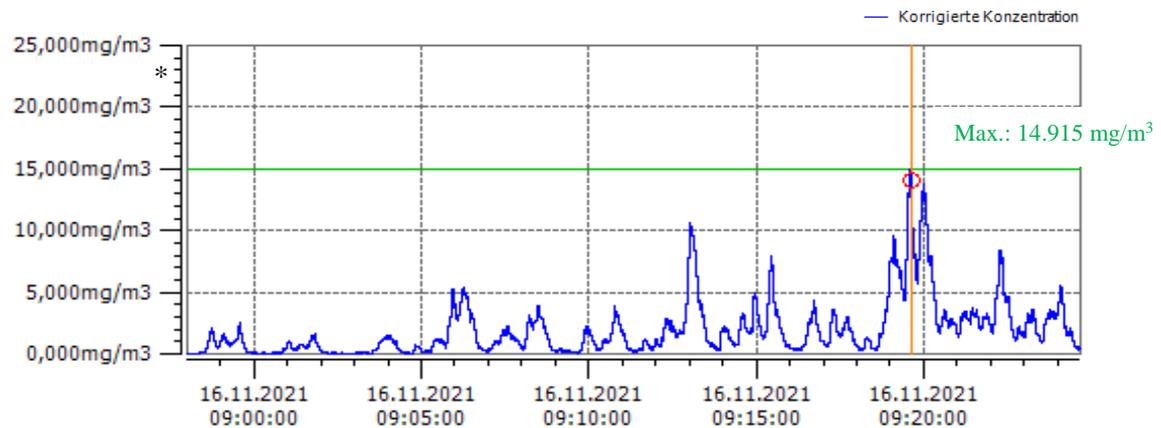


Abbildung 4.33: links: Anbringung Probenahmesonde am Versuchsstand; rechts: TUFF-Luftprobenahmepumpe, nach [136, S. 2]

Die Auswertung der durchschnittlichen und maximalen Staubkonzentrationen wird mit der zum CEL-712 Microdust Pro Echtzeit Staubmonitor passenden Software „Casella insight“ durchgeführt. In Abbildung 4.34 ist der Verlauf der Staubkonzentration in der genannten Software am

Beispiel von V24 an Werkstück 1 mit TS1 (CER) dargestellt. Hervorgehoben ist die maximale Staubkonzentration mit 14.915 mg/m^3 .



*: Die Staubkonzentrationen in mg/m^3 auf der Ordinate sind englische Einheiten. Das Komma zeigt daher die Tausenderzahlen an.

Abbildung 4.34: Staubkonzentration TS1 (CER) – V24 an Werkstück 1

4.6 Versuchsplanung und -durchführung

Nachdem in den vorangegangenen Absätzen ausführlich auf das zu untersuchende System eingegangen wurde, folgt nun die Beschreibung der Versuchsplanung und -durchführung. Sowohl die Versuchsplanung als auch die Versuchsdurchführung sind entscheidend für die Generierung einer zuverlässigen Datenbasis. In *Klocke* [82, S. 492] werden drei zentrale Anforderungen an die experimentelle Versuchsdurchführung nach dem Philosoph Wundt zitiert. Diese lauten wie folgt:

- „Willkürlichkeit: Das zu untersuchende Ereignis muss durch den Experimentator absichtlich ausgelöst werden können, um so eine systematische Beobachtung zu ermöglichen.
- Wiederholbarkeit: Das Experiment muss bei gleichen Versuchsbedingungen replizierbar sein, sodass eine erneute Überprüfung des erzielten Ergebnisses möglich ist.
- Variierbarkeit: Einzelne Parameter des Experimentes müssen unabhängig voneinander verändert werden können, sodass die Effekte²⁰ separat ergründet werden können.“

Für eine ingenieurwissenschaftliche Betrachtung der Zusammenhänge von Ursache und Wirkung ist demnach u.a. die Reproduzierbarkeit der Randbedingungen der Versuchsreihen, bei welchen die definierten Eingangsgrößen gezielt veränderbar sein müssen, unerlässlich [82, S. 492]. Die gezielt veränderbaren Eingangsgrößen kennzeichnen die Steuergrößen, welche im Parameterdiagramm in Abbildung 4.1 definiert wurden.

²⁰ Nach *Siebertz et al.* [75, S. 12,15] wird die Wirkung eines Faktors auf das zu untersuchende System Effekt genannt. Eine Wechselwirkung oder Wechseleffekt liegt vor, sobald der Effekt eines Faktors von der Einstellung eines anderen Faktors abhängig ist.

Grundsätzlich können Experimente unter praxisnahen Versuchsbedingungen oder als Simulation in einer virtuellen Umgebung durchgeführt werden. Wie anhand der Systembeschreibung deutlich wurde, wird in der vorliegenden Arbeit der erste Fall umgesetzt. Der zu untersuchende Prozess der Rohrinrentrennung wird unter Berücksichtigung der Werkstück-Geometrien in kerntechnischen Anlagen und den Anforderungen an die Trennverfahren auf die Entwicklung eines geeigneten Versuchsstandes übertragen. Infolge der reduzierten Komplexität können die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge separat und detailliert analysiert werden. Abgesehen von einer Beobachtung der Versuchsreihen können systemrelevante Daten durch die in den Versuchsstand integrierte Sensoren und durch die Anwendung ergänzender Messtechnik wie einen Laser-Profil-Scanner, eine Wärmebildkamera oder einen Echtzeit-Staubmonitor ermittelt werden. Zusätzlich kann der Einfluss von Störgrößen und „error states“ durch die Wiederholung von Versuchsreihen bei gleichem oder unterschiedlichen Versuchsaufbau gezielt analysiert werden. [82, S. 492]

Mit dem entwickelten Versuchsstand zur Rohrinrentrennung in Kombination mit der verwendeten Messtechnik ist eine gezielte Untersuchung der Parametergruppen Werkzeug, Werkstück und Maschine möglich. Die Versuchsreihen zur Rohrinrentrennung sind in Vor- und Hauptversuche unterteilt. In Tabelle 4.13 sind alle Faktoren einschließlich der zugehörigen Stufenwerte für die untersuchten Trennwerkzeuge dargestellt.

Kategorielle Faktoren können lediglich beschrieben aber nicht durch eine Messskala o.ä. definiert werden. Im Gegensatz dazu können stetige Faktoren durch geeignete Messtechnik konkret eingestellt werden und theoretisch jeden Zwischenwert innerhalb eines gewählten Stufenabstandes annehmen. [9, S. 56] Demnach fallen in der vorliegenden Arbeit die zu untersuchenden Trennwerkzeuge und Werkstücke unter kategorielle Größen, die Vorschubgeschwindigkeit wie auch die Drehzahlen für Scheibenfräser und Kreissägeblätter sind stetige Größen. Die Drehzahl der Trennscheiben und die Werkstückdrehung sind während der Versuchsdurchführung konstant.

Tabelle 4.13: Faktoren und Stufenwerte für die Versuchsplanerstellung, nach [9, S. 56]

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
Trennwerkzeug	[-]	kategoriell	SF1 (HSS), KSB1 (HSS), KSB2 (HSS, TiAlN), KSB3 (VHM, TiAlN), TS1 (CER), TS2 (A), TS3 (D)
Werkstück	[-]	kategoriell	1,2,3,4,5
Vorschubgeschwindigkeit	[-]	stetig	$V_{f1}, V_{f2}, V_{f3}, V_{f4}, V_{f5}, V_{f6}$
Drehzahl Scheibenfräser/ Kreissägeblätter	$[\text{min}^{-1}]$	stetig	50, 100, 150, 200, 250
Drehzahl Trennscheiben	$[\text{min}^{-1}]$	konstant	6.000
Werkstückdrehung	$[\text{min}^{-1}]$	konstant	0,25

Wesentliches Ziel der Vor- und Hauptversuche ist das Generieren einer zuverlässigen Datenbasis, die als Grundlage für die anschließenden Untersuchungen der Betriebsparameter zur Rohrinrentrennung dient. Dies setzt einerseits voraus, dass die Randbedingungen, unter welchen die erzeugten Daten ermittelt wurden, nachvollziehbar und transparent dokumentiert

werden. Andererseits müssen Messabweichungen durch den Messvorgang vermieden werden. [82, S. 494]

Wie das ISHIKAWA²¹-Diagramm in Abbildung 4.35 zeigt, wirken auf jedes Messergebnis zahlreiche Einflüsse ein, die Messfehler zur Folge haben können. Mögliche Ursachen für Messabweichungen liegen nach *Klocke* [82, S. 13-14] im Messverfahren, dem Messobjekt und den Messgeräten wie auch in der Versuchsvorbereitung, der Umgebung und der zu messenden Person.

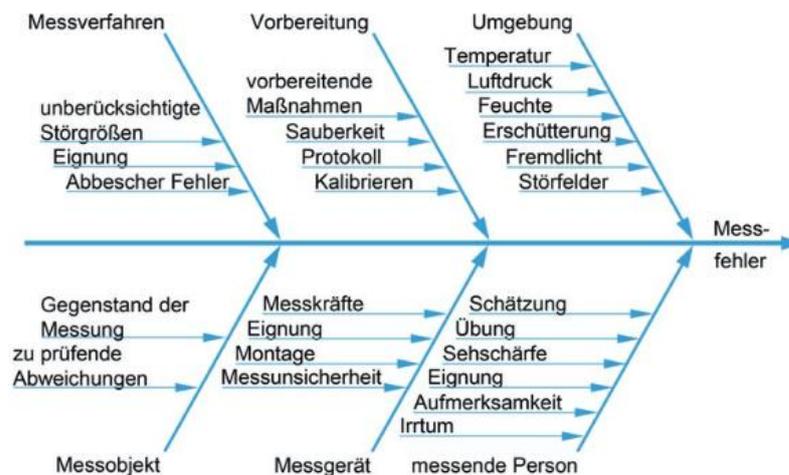


Abbildung 4.35: Ursachen für Messabweichungen durch den Messvorgang [82, S. 13]

Die genannten Ursachen werden durch eine standardisierte und automatische Versuchsdurchführung, eine gründliche Versuchsvorbereitung und durch die Durchführung bei annähernd identischen Umgebungsbedingungen in der Versuchshalle des TMB miniert. Zudem werden die Versuchsreihen durch eine zu messende Person durchgeführt und die Messgeräte vor Einsatz überprüft und ggf. kalibriert. Kein Einfluss kann dahingegen auf die Abweichungen der einzelnen Trennwerkzeuge und auf das Messobjekt, sprich den Werkstücken, geübt werden. Bei Letzteren können Messabweichungen u.a. auf Formabweichungen zurückgeführt werden. Damit werden Abweichungen „von einer vorgeschriebenen, idealen geometrischen Eigenschaft, wie Geradheit, Ebenheit, Rundheit oder Zylinderform bezeichnet [82, S. 13].“ Bei Rohrleitungen sind Abweichungen von der Rundheit federführend auf den Herstellungsprozess zurückzuführen. So weisen die Rohre in sich wie auch im Vergleich zu anderen Rohrleitungen keine idealen geometrischen Eigenschaften auf. Bei geschweißten Rohren ist i.d.R. eine größere Abweichung als bei nahtlosen Rohren zu beobachten. Um den Einfluss dieser Messabweichung gering zu halten, werden die Werkstücke vor jeder Versuchsdurchführung mit einer Messuhr zentriert und die Position der Werkstücke überprüft. Eine Berücksichtigung und Minimierung der Einflüsse ist zwingend erforderlich, um eine möglichst hohe Messgenauigkeit zu erzielen. [82, S. 13]

²¹ Das ISHIKAWA-Diagramm oder Ursache-Wirkungs-Diagramm stellt nach dem *Bundesministerium des Inneren und für Heimat (BMI)* und dem *Bundesverwaltungsamt (BVA)* [150] „die Visualisierung eines Problemlösungsprozesses dar, bei dem analytisch nach den Ursachen eines Problems gesucht wird, indem Hauptursachen solange zerlegt werden, bis die Wurzel des Problems erreicht ist.“

5 Ergebnisse und Auswertung experimentelle Versuchsreihen

In diesem Kapitel wird durch die Auswertung der generierten Datenbasis der experimentelle Forschungsbeitrag der Arbeit behandelt. Hierdurch sollen die drei in Absatz 1.2 definierten und in Tabelle 5.1 aufgelisteten Forschungsfragen beantwortet werden. Die Auswertung der Daten wird grundsätzlich separat für die drei unterschiedlichen Trennwerkzeuge durchgeführt. Da sich die Untersuchungen zu den Betriebsparametern wie Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl für Scheibenfräser und Kreissägeblätter überschneiden und derselbe Antriebsmotor verwendet wird, werden die Versuchspläne bzw. Versuchsreihen dieser Trennwerkzeuge kombiniert. Die Versuchspläne für die experimentellen Versuchsreihen mit Trennscheiben sind unabhängig von jenen mit Scheibenfräser und Kreissägeblättern. Anhang A-3 sind die Versuchspläne für Trennscheiben bzw. Anhang B-4 die für Scheibenfräser und Kreissägeblätter zu entnehmen

Tabelle 5.1: Zuordnung der Forschungsfragen zur Ergebnisdarstellung, nach [9, S. 58]

Forschungsfragen	Absatz	
	Trennscheiben	Scheibenfräser/ Kreissägeblätter
1. Welchen Einfluss haben unterschiedliche Rohrleitungen hinsichtlich Durchmesser und Material in nahtloser und geschweißter Ausführung in verschiedenen Einbaulagen (freiliegend, einbetoniert) auf die Rohrintrennung mittels spanender Trennwerkzeuge?	Absatz 5.1.3: Versuchsreihe 1, 2 und 5	Absatz 5.2.3: Versuchsreihe 1 und 2
2. Mit welchem der drei untersuchten spanenden Trennwerkzeuge – Scheibenfräser, Kreissägeblätter und Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik, Korund und Diamant – kann ein kontinuierlicher Volumenabtrag und damit eine zur Rohrintrennung notwendige Schnittgüte, unter dem Gesichtspunkt der Verschleißoptimierung, erreicht werden?	Absatz 5.1.4: Versuchsreihe 1 und 2 A-2: Versuchsreihe 1 und 3	B-2: Versuchsreihe 1,2 und 4 B-3: Versuchsreihe 1 und 3
3. Wie sind werkzeugabhängig die Betriebsparameter (Vorschub- und Umfangsgeschwindigkeit) für eine neuartige Rohrintrennvorrichtung zu wählen?	Absatz 5.1.6	Absatz 5.2.4

Zur Analyse der Effekte der in Tabelle 4.13 aufgeführten Faktoreinstellungen werden die in den experimentellen Versuchsreihen generierten Datensätze anhand verschiedenen Diagrammtypen ausgewertet und die Ergebnisse einem Vergleich unterzogen. Neben Säulen- und Punktliniendiagrammen werden zur Visualisierung der Daten u.a. Box-Whisker-Plots verwendet. Andere Bezeichnungen hierfür sind Boxplot oder seltener auch Kasten- bzw. Schachtelgrafik. Die in der Datenauswertung verwendeten Box-Whisker-Plots sind gemäß Abbildung 5.1, welche alle wichtige Kenngrößen zur Beschreibung eines Boxplots enthält, zu verstehen.

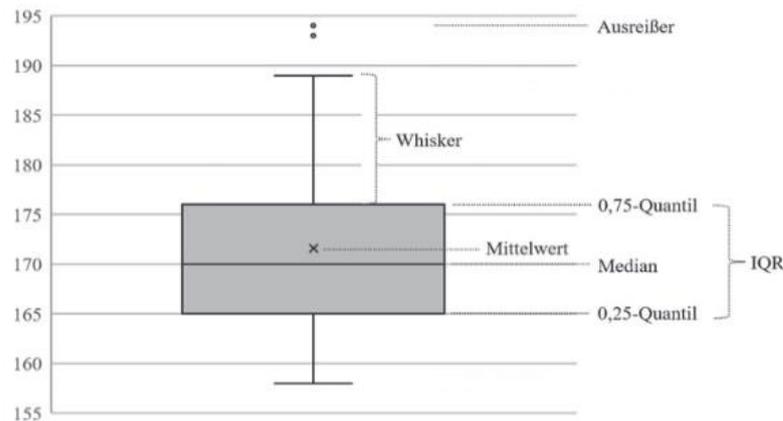


Abbildung 5.1: Kenngrößen eines Box-Whisker-Plots [137, S. 132]

Das zentrale Element stellt die namensgebende Box dar, die nach *Duller* [137, S. 132] „durch das erste und dritte Quartil begrenzt ist und im Inneren üblicherweise den Median²² (= zweites Quartil) umschließt [...]. Damit enthält die Box die „mittlere“ 50 % der Daten, die Länge der Box entspricht dem Interquartilsabstand (IQR, Interquartilsrange), welcher neben Range, Streuung und Varianz auch ein Streuungsmaß ist.“ Die von der Box ausgehenden Linien (Whisker) reichen vom oberen Rand der Box bis zum Maximum bzw. vom unteren Rand der Box bis zum Minimum der Datenreihe. Ausreißer oder Extremwerte, d.h. einzelne Daten, die außerhalb dieses Bereiches liegen, werden als gesonderte Punkte markiert. [9, S. 62], [137, S. 133]

5.1 Versuchsreihen mit Trennscheiben

Basierend auf den bisherigen Ausführungen zur Systembeschreibung und der Versuchsplanung und -durchführung werden in den nächsten Absätzen die Ergebnisse der generierten Daten anhand der Zielgrößen für Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik (TS1 (CER)), Korund (TS2 (A)) und Diamant (TS3 (D)) ausgewertet. Die im nachfolgenden beschriebenen Versuchsreihen mit Trennscheiben an verschiedenen Werkstücken zur Rohrintrennung sind motiviert durch die:

- Untersuchung der **Schnittkraftentwicklung** in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Schleifmittel,
- Ermittlung des **Volumenabtrages** in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Schleifmittel,
- Untersuchung der **Standzeit** durch die Analyse des **Massenverlustes** und der **Wärmeentwicklung** in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Schleifmittel
- Untersuchung der **Staubkonzentration** in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Schleifmittel.

Die genauen Daten der Trennscheiben sind in Absatz 4.2.2.1 und die der verwendeten Werkstücke in Absatz 4.3 nachzuschlagen. Bei der grafischen Auswertung der Daten wird jedem

²² Der Median stellt den mittleren Wert in einer nach der Größe geordneten Datenreihe dar [152].

Schleifmittel ein Farbton zugeordnet. Das Schleifmittel Keramik wird in blau, Korund in orange und Diamant in grau dargestellt. In der Abbildungs- bzw. Tabellenbeschriftung wird jeweils explizit erwähnt, welchem Werkstück die Daten zuzuordnen sind.

5.1.1 Vorversuche Trennscheiben

Zu Beginn werden zur Eingrenzung der Vorschubgeschwindigkeit Vorversuche durchgeführt. Hierbei geht es darum, die Systemgrenzen für Trennscheiben zu untersuchen und die Stufenwerte für die anschließenden Hauptversuche einzugrenzen. Die Versuchsreihen mit Scheibenfräser und Kreissägeblättern, hierauf wird in 5.2.1 näher eingegangen, haben gezeigt, dass zu niedrige und zu hohe Vorschubgeschwindigkeiten bei diesen Trennwerkzeugen nicht zur Rohrintrennung geeignet sind. Wie Tabelle 5.2 zu entnehmen ist, werden in den Vorversuchen mit Trennscheiben insgesamt sechs verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten bei einer Drehzahl von 6.000 min^{-1} an Werkstück 1 (1.4541, d_A : 219,1 mm, geschweißt) untersucht. Für die Vorversuche wird exemplarisch TS1 (CER) mit einem Scheibendurchmesser von 125 mm ausgewählt. Es ergeben sich insgesamt sechs Vorversuche.

Tabelle 5.2: Stufenwerte Vorversuche mit TS1 (CER)

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
Vorversuche			
Trennwerkzeug	[-]	kategoriiell	TS1 (CER)
Werkstück	[-]	kategoriiell	1
Vorschubgeschwindigkeit	[-]	stetig	$V_{f1}, V_{f2}, V_{f3}, V_{f4}, V_{f5}, V_{f6}$
Summe Vorversuche			6

Im Gegensatz zu den experimentellen Versuchsreihen mit Scheibenfräser und Kreissägeblättern hat sich das System über alle Stufenwerte der Vorschubgeschwindigkeiten als stabil erwiesen. Folglich wird in den Hauptversuchen die gesamte Spannweite der Vorschubgeschwindigkeit von V_{f1} bis V_{f6} untersucht.

5.1.2 Hauptversuche Trennscheiben

Innerhalb der Hauptversuche werden vier Versuchsreihen durchgeführt. Tabelle 5.3 gibt die untersuchten Stufenwerte und Faktoren der einzelnen Versuchsreihen wieder. In Summe werden demnach 41 Hauptversuche²³ durchgeführt. Die Eingangsgrößen der einzelnen Versuchsreihen sind in Anhang A-3 zusammengefasst.

Anhand der ersten beiden Versuchsreihen wird der Einfluss der Schweißnaht auf die Rohrintrennung mittels Trennscheiben untersucht. Werkstück 1, an welchem die erste Versuchsreihe durchgeführt wird, weist die gleichen geometrischen Randbedingungen wie Werkstück 2 auf und ist aus demselben Werkstoff (1.4541) hergestellt. Der einzige Unterschied zwischen den Werkstücken liegt in der geschweißten Ausführung von Werkstück 1. Da alle weiteren Faktoren

²³ Aufgrund von einzelnen Versuchswiederholungen gehen die Versuchsnummern der Vor- und Hauptversuche für Trennscheiben von Nummer 1 bis 52.

zwischen den ersten beiden Versuchsreihen identisch sind, kann der Einfluss der Schweißnaht auf die Zielgrößen untersucht werden.

Anhand der dritten Versuchsreihe mit Werkstück 3 soll analysiert werden, ob die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe auf einen größeren Werkstückdurchmesser übertragbar sind. Werkstück 3 (d_A : 273,0 mm) hat im Gegensatz zu Werkstück 1 (d_A : 219,1 mm) einen größeren Außendurchmesser. Sowohl Werkstück 1 als auch Werkstück 3 haben eine Schweißnaht und sind aus dem Werkstoff 1.4541 gefertigt.

Die fünfte Versuchsreihe findet an Werkstück 5 und damit an einer einbetonierten Rohrleitung statt. Es werden TS1 (CER) und TS3 (D) getestet. Durch die vorangegangenen Versuchsreihen und die damit einhergehenden Erkenntnisse, konnte TS2 (A) für diese Versuchsreihe ausgeschlossen werden. Werkstück 5 besteht wie Werkstück 4 aus dem Werkstoff 1.0345. Demnach kann anhand von Versuchsreihe 5 auch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf einen anderen Werkstoff untersucht werden. Für alle Versuchsreihen werden jeweils neue Trennscheiben verwendet, um die Wirkung der Faktoren, sprich die Effekte, abbilden zu können.

Tabelle 5.3: Stufenwerte Hauptversuche TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D)

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
Versuchsreihe 1			
Trennwerkzeug	[-]	kategoriell	TS1 (CER), TS2 (A), TS3 (D)
Werkstück	[-]	kategoriell	1
Vorschubgeschwindigkeit	[-]	stetig	$V_{f1}, V_{f2}, V_{f3}, V_{f4}, V_{f5}, V_{f6}$
Versuchsreihe 2			
Trennwerkzeug	[-]	kategoriell	TS1 (CER), TS2 (A), TS3 (D)
Werkstück	[-]	kategoriell	2
Vorschubgeschwindigkeit	[-]	stetig	$V_{f1}, V_{f2}, V_{f3}, V_{f4}, V_{f5}, V_{f6}$
Versuchsreihe 3			
Trennwerkzeug	[-]	kategoriell	TS1 (CER)
Werkstück	[-]	kategoriell	3
Vorschubgeschwindigkeit	[-]	stetig	V_{f2}, V_{f3}, V_{f4}
Versuchsreihe 5			
Trennwerkzeug	[-]	kategoriell	TS1 (CER), TS3 (D)
Werkstück	[-]	kategoriell	5
Vorschubgeschwindigkeit	[-]	kategoriell	V_{f5}
Summe Hauptversuche			41

5.1.3 Ergebnisse und Auswertung Schnittkraft und Volumenabtrag

Versuchsreihe 1 und 2: Vergleich Schnittkraft TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D)

Zu Beginn der Analyse der Schnittkraft werden die Ergebnisse der auftretenden durchschnittlichen und maximalen Schnittkräfte für TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 1 und 2 über die Vorschubgeschwindigkeiten von V_{f1} bis V_{f6} einem Vergleich unterzogen. Anhand der Box-Whisker-Plots in Abbildung 5.2 kann als erstes Ergebnis festgehalten werden, dass TS3 (D) größere Schnittkräfte an Werkstück 1 und 2 als TS1 (CER) und TS2 (A) erzeugt. Zwischen TS1 (CER) und TS2 (A) können dahingegen nur kleine Unterschiede festgestellt werden.

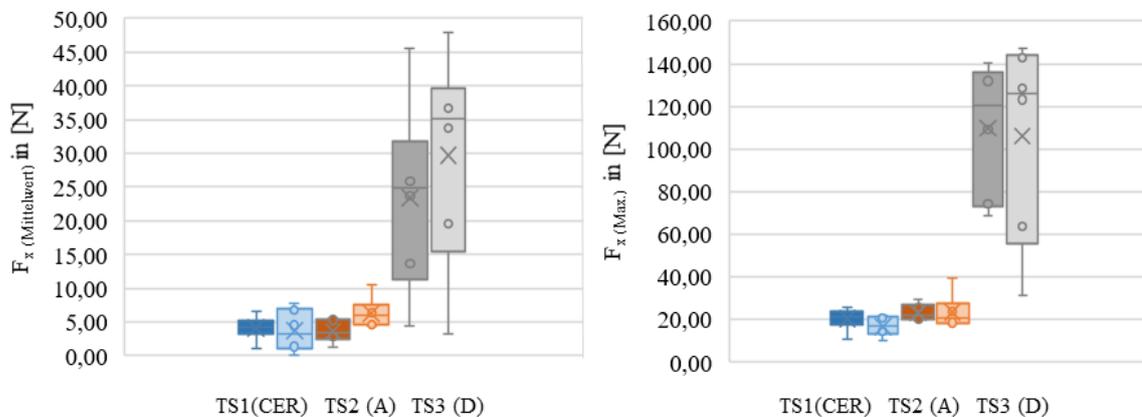


Abbildung 5.2: links: Schnittkraft F_x (Mittelwert); rechts: Schnittkraft F_x (Max.) für TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) jeweils an Werkstück 1 und Werkstück 2

Die Schnittkräfte (Durschnitt und Maximum) an TS1 (CER) und TS2 (A) sind an beiden Werkstücken über die untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten von V_{f1} bis $V_{f6} \leq 40$ N. Bei TS3 (D) werden dahingegen maximale Kräfte von bis zu 150 N gemessen.

Um fundierte Aussagen zur Schnittkraft ableiten zu können, wird im nächsten Abschnitt die Schnittkraftentwicklung u.a. in Kombination mit dem Volumenabtrag untersucht. Grund hierfür ist, dass die Schnittkräfte u.a. für TS3 (D) großen Schwankungen unterworfen sind. Sichtbar wird dies zum einen durch die Größen der Box in Abbildung 5.2., zum anderen durch den Verlauf von F_x (Mittelwert) über die erste Versuchsreihe in Abbildung 5.3. Nur durch die Betrachtung der Schnittkräfte kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Schnittkraft für TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) hergestellt werden.

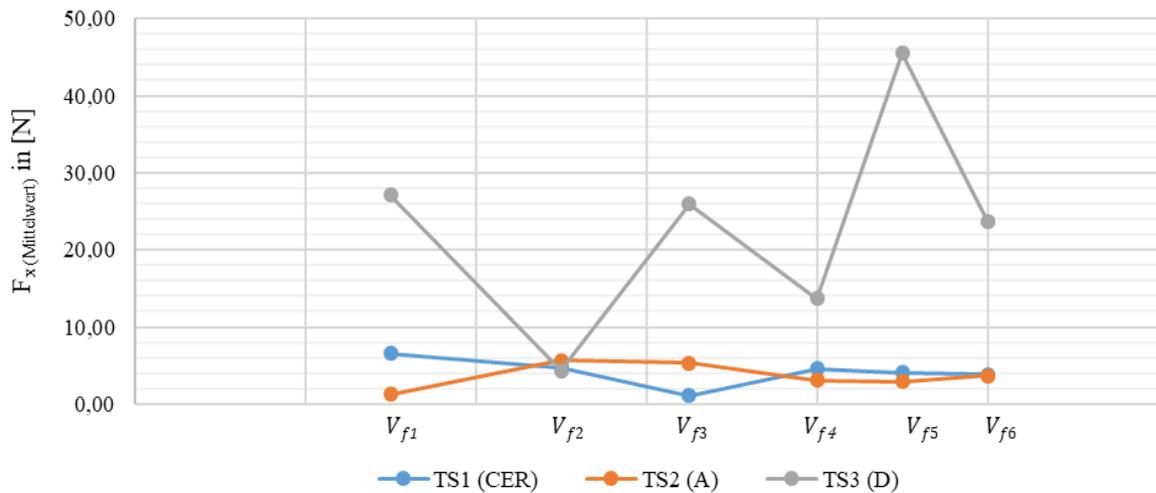


Abbildung 5.3: Schnittkraftentwicklung für TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit an Werkstück 1

Versuchsreihe 1 und 2: Volumenabtrag und Schnittkraft TS1 (CER)

Ziel der nachfolgenden Auswertung ist es, einen Zusammenhang zwischen der Schnittkraftentwicklung und dem Volumenabtrag von TS1 (CER) herzustellen, um die Schwankungen des Schnittkraftverlaufes für F_x (Mittelwert) an Werkstück 1 in Abbildung 5.3 erklären zu können. Dazu sind in Abbildung 5.4 die Ergebnisse des Volumenabtrages der ersten Versuchsreihe sowie F_x (Mittelwert) und F_x (Max.) über die Vorschubgeschwindigkeiten von V_{f1} bis V_{f6} für TS1 (CER) aufgetragen. Die Einheiten der Datenwerte und die der Achsenbeschriftungen können der linksseitig angeordneten Legende entnommen werden. Die Versuchsnummern sind oberhalb des Diagramms eingefügt. Diese Erläuterungen gelten für alle Diagramme dieser Form.

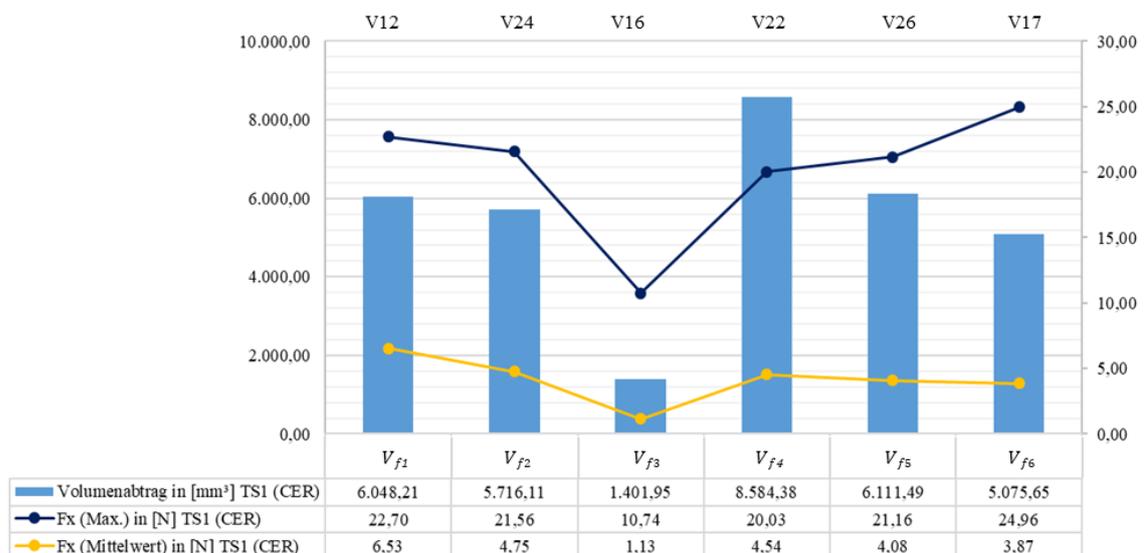


Abbildung 5.4: Vergleich Schnittkraft und Volumenabtrag von TS1 (CER) an Werkstück 1

Es wird ersichtlich, dass die Verläufe für die Schnittkraft (Durchschnitt und Maximum) mit dem des Volumenabtrages, abgesehen von kleinen Abweichungen wie z.B. für F_x (Max.) bei V17,

übereinstimmen. Demnach steigt die Schnittkraft mit einem erhöhten Volumenabtrag. Weiter gilt, dass die Schnittkraft mit einem abnehmenden Volumenabtrag sinkt. Durch die gemeinsame Betrachtung von Schnittkraft und Volumenabtrag in Abbildung 5.4 kann u.a. für V16 erklärt werden, weshalb der Volumenabtrag mit 1.401,95 N deutlich geringer als bei den restlichen Versuchen der ersten Versuchsreihe ausfällt. In V16 konnte eine verhältnismäßig geringe maximale Schnittkraft $F_{x(\text{Max.})}$ mit 10,74 N bzw. im Durchschnitt mit $F_{x(\text{Mittelwert})}$ mit 1,13 N aufgebracht werden.

Die erste Versuchsreihe am geschweißten Rohr (Werkstück 1) zeigt jedoch keinen Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Volumenabtrag für TS1 (CER). Der Volumenabtrag schwankt über die untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten hinweg. Um hierfür Ursachen identifizieren zu können, werden im nächsten Schritt die Daten von Versuchsreihe 2 an Werkstück 2 (nahtlos) analysiert. Wie für Versuchsreihe 1 sind hierzu in Abbildung 5.5 neben dem Volumenabtrag die Schnittkräfte $F_{x(\text{Mittelwert})}$ und $F_{x(\text{Max.})}$ über die sechs Vorschubgeschwindigkeiten V_{f1} bis V_{f6} aufgetragen. Für den Volumenabtrag und $F_{x(\text{Max.})}$ sind außerdem die lineare Trendlinie einschließlich des Bestimmungsmaßes R^2 [-] eingefügt.

Die Datenauswertung der zweiten Versuchsreihe lässt Zusammenhänge zwischen der Vorschubgeschwindigkeit, dem Volumenabtrag und der Schnittkraft erkennen. Bei TS1 (CER) wird durch eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit ein größerer Volumenabtrag des Werkstückes erzielt während die Schnittkräfte steigen.²⁴

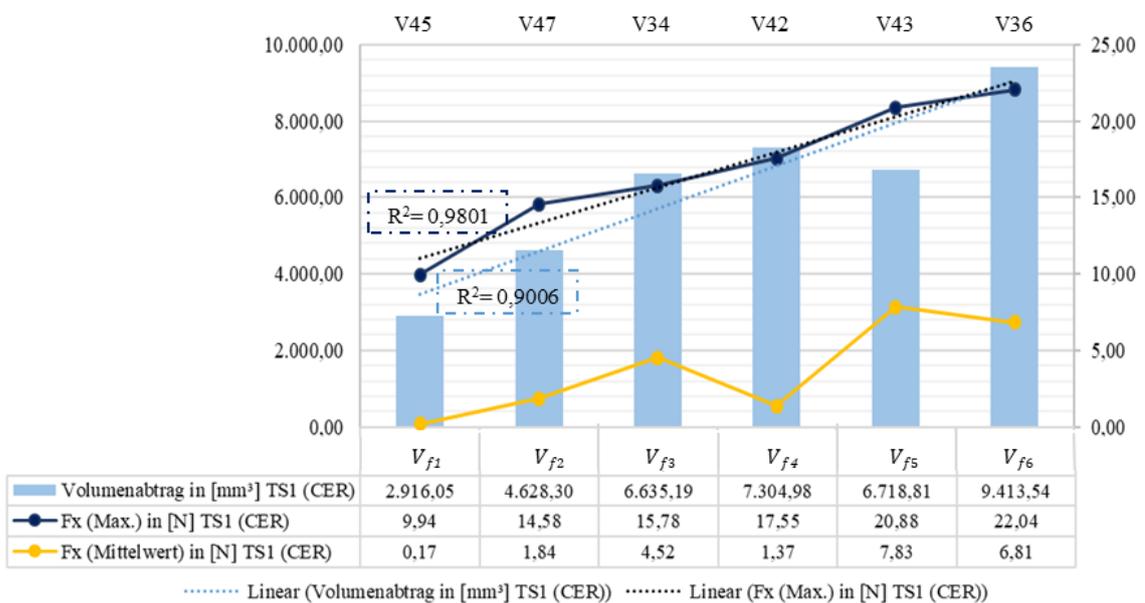


Abbildung 5.5: Vergleich Schnittkraft und Volumenabtrag von TS1 (CER) an Werkstück 2

Aus den Daten von Versuchsreihe 1 und Versuchsreihe 2 folgt die wissenschaftliche Erkenntnis, weshalb in Abbildung 5.4 kein Zusammenhang zwischen der Vorschubgeschwindigkeit und

²⁴ Eine Abweichung hiervon stellt $F_{x(\text{Mittelwert})}$ bei V42 dar. $F_{x(\text{Max.})}$ nimmt jedoch mit steigender Vorschubgeschwindigkeit zu. Bei V43 ist der Volumenabtrag trotz steigender Schnittkräfte etwas zu gering.

dem Volumenabtrag hergestellt werden konnte. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Versuchsreihen ist die geschweißte bzw. nahtlose Ausführung der untersuchten Werkstücke. Der niedrigere Volumenabtrag an Werkstück 1 ist demnach auf die größere Ovalität der Rohrleitung, bedingt durch die Herstellung der Längsschweißnaht, zurückzuführen. Wie in Absatz 2.3.4 aufgezeigt, können Rohrleitungen mit Längsschweißnaht u.a. durch das Fretz-Moon-Verfahren gefertigt werden. Die idealere Rundheit von nahtlosen Rohren wirkt sich demnach positiv auf die Rohrrinntrennung aus. Dies ist vor allem für jene Rohrleitungen von wesentlicher Bedeutung, die beispielsweise aufgrund der Einbaulage und zur Vermeidung einer möglichen Kontaminationsverschleppung nur bis auf eine gewisse Restwanddicke getrennt werden sollten.

Durch die Angabe des Bestimmtheitsmaßes R^2 [-] mit 0,9006 über die generierten Daten von TS1 (CER) für den Volumenabtrag in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit kann dieser Zusammenhang mathematisch belegt werden. Ebenfalls bestätigt werden kann der Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Schnittkraft durch ein Bestimmtheitsmaß R^2 mit 0,9801 (für $F_{x \text{ (Max.)}}$). Es folgen weitere mathematische Auswertungen hierzu.

Mathematische Auswertung Vorschubgeschwindigkeit und Volumenabtrag:

Die Zuverlässigkeit einer Trendlinie wird anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 ausgedrückt. Liegt dieses bei oder in der Nähe von eins, kann dies als ein Regressionsansatz mit guter Anpassung gedeutet werden. Formal ist das Bestimmtheitsmaß nach *Lüken und Schimmelpfening* [138] „der Anteil der abhängigen Variable, der durch die unabhängige(n) Variablen (n) erklärt wird.“ Insofern kann das Bestimmtheitsmaß nur Werte zwischen null und eins annehmen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 [-] kann mit dem Korrelationskoeffizienten r [-] nach Pearson berechnet werden. Es besteht folgender Zusammenhang [139]:

$$| r | = \sqrt{R^2} \quad (1.3)$$

Der Korrelationskoeffizient r nach Pearson berechnet sich zu [140]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2}} \quad (1.4)$$

Die arithmetischen Mittel \bar{x} und \bar{y} in Formel (1.4) sind definiert durch (1.5) und (1.6) [141]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.5)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_i \quad (1.6)$$

Demnach berechnet sich das arithmetische Mittel aus dem Quotienten der Summe aller Einzelwerte einer Datenreihe und der Anzahl n der Einzelwerte. Das arithmetische Mittel wird auch als Mittelwert bezeichnet. [141] In der vorliegenden Arbeit werden beide Termini verwendet.

Der Korrelationskoeffizient r nach Pearson und das Bestimmtheitsmaß R^2 für Vorschubgeschwindigkeit und Volumenabtrag für TS1 (CER) an Werkstück 2 errechnet sich mit den Angaben aus Tabelle 5.4 und

$$\bar{x} = \frac{1}{6} * 207,50 \text{ Hz} = 34,58 \text{ Hz}$$

bzw.
$$\bar{y} = \frac{1}{6} * 37.616,87 \text{ mm}^3 = 6.269,48 \text{ mm}^3$$

zu:

$$r = \frac{1.440.314,58 - 6 * 34,58 * 6.269,48}{\sqrt{8.031,25 - 6 * 34,58^2} * \sqrt{261.070.130,78 - 6 * 6.269,48^2}} = 0,9490$$

$$R^2 = 0,9490^2 = 0,9006$$

Tabelle 5.4: Angaben zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für Vorschubgeschwindigkeit und Volumenabtrag (TS1 (CER)/Werkstück 2)

n [-]	x [Hz]	x ² [Hz ²]	y [mm ³]	y ² [(mm ³) ²]	x*y [Hz*mm ³]
1	15,00	225,00	2.916,05	8.503.347,60	43.740,75
2	25,00	625,00	4.628,30	21.421.160,89	115.707,50
3	32,50	1.056,25	6.635,19	44.025.746,34	215.643,68
4	40,00	1.600,00	7.304,98	53.362.732,80	292.199,20
5	45,00	2.025,00	6.718,81	45.142.407,82	302.346,45
6	50,00	2.500,00	9.413,54	88.614.735,33	470.677,00
Σ	207,50	8.031,25	37.616,87	261.070.130,78	1.440.314,58

Der funktionale Zusammenhang zwischen der Vorschubgeschwindigkeit und dem Volumenabtrag für TS1 (CER) an Werkstück 2 kann mittels einer linearen Regressionsanalyse beschrieben werden. Durch eine lineare Funktion mit der Gleichung [142, S. 87]:

$$y = mx + b \quad (1.7)$$

wird der Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer unabhängigen Variablen abgebildet. Die Steigung m [-] der Geraden berechnet sich nach (1.8) und der Schnittpunkt der Geraden mit der y-Achse b [-] nach (1.9):

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.8)$$

$$b = \bar{y} - m * \bar{x} \quad (1.9)$$

Für TS1 (CER) an Werkstück 2 kann der Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Volumenabtrag durch die Gleichung der linearen Trendlinie, zu sehen in Abbildung 5.6, mit folgender Gerade beschrieben werden:

$$y = 162,99x + 633$$

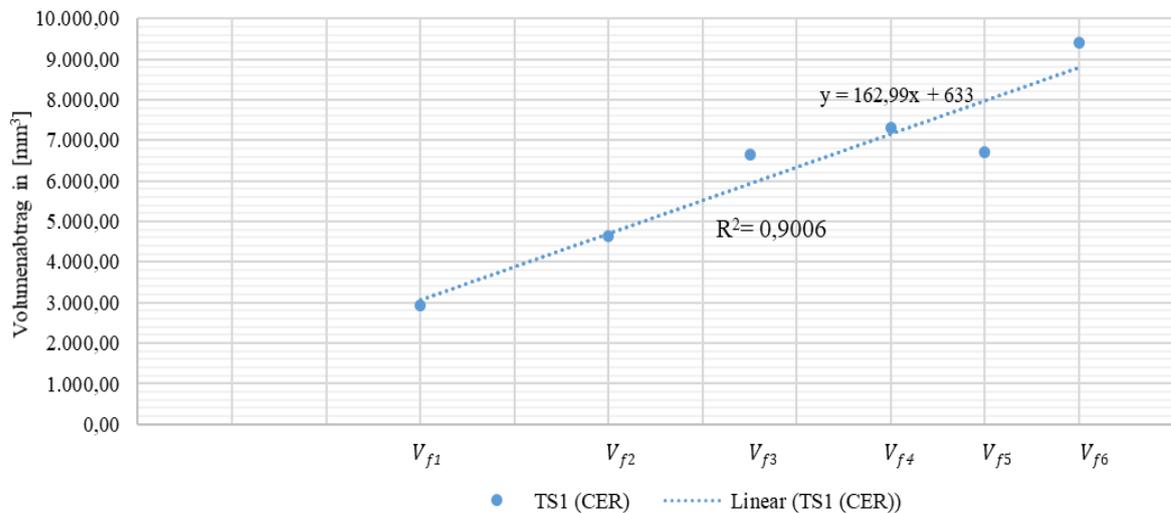


Abbildung 5.6: Lineare Regression Vorschubgeschwindigkeit und Volumenabtrag für TS1 (CER) an Werkstück 2

Mathematische Auswertung Vorschubgeschwindigkeit und Schnittkraft:

Der Korrelationskoeffizient r nach Pearson und das Bestimmtheitsmaß R^2 für Vorschubgeschwindigkeit und Schnittkraft ($F_{x \text{ (Max.)}}$) für TS1 (CER) an Werkstück 2 errechnet sich mit $\bar{x} = 34,58$ Hz, $\bar{y} = 16,76$ N und den Angaben aus Tabelle 5.5 zu:

$$r = \frac{3.770,05 - 6 \cdot 34,58 \cdot 16,76}{\sqrt{8.031,25 - 6 \cdot 34,58^2} \cdot \sqrt{1.790,13 - 6 \cdot 16,76^2}} = 0,99$$

$$R^2 = 0,99^2 = 0,9801$$

Tabelle 5.5: Angaben zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für Vorschubgeschwindigkeit und Schnittkraft (TS1 (CER)/Werkstück 2)

n	x	x ²	y	y ²	x*y
[-]	[Hz]	[Hz ²]	[N]	[N ²]	[Hz*N]
1	15,00	225,00	9,94	98,80	149,10
2	25,00	625,00	14,58	212,58	364,50
3	32,50	1.056,25	15,78	249,01	512,85
4	40,00	1.600,00	17,55	308,00	702,00
5	45,00	2.025,00	20,88	435,97	939,60
6	50,00	2.500,00	22,04	485,76	1.102,00
Σ	207,50	8.031,25	100,77	1.790,13	3.770,05

Die Trendlinie ist bestimmt durch die Gleichung:

$$y = 0,33x + 5,346$$

Abbildung 5.7 zeigt die Geradengleichungen der Trendlinien für den Volumenabtrag bzw. die Schnittkraft ($F_{x \text{ (Max.)}}$) in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit V_{f1} bis V_{f6} für TS1 (CER) an Werkstück 2.

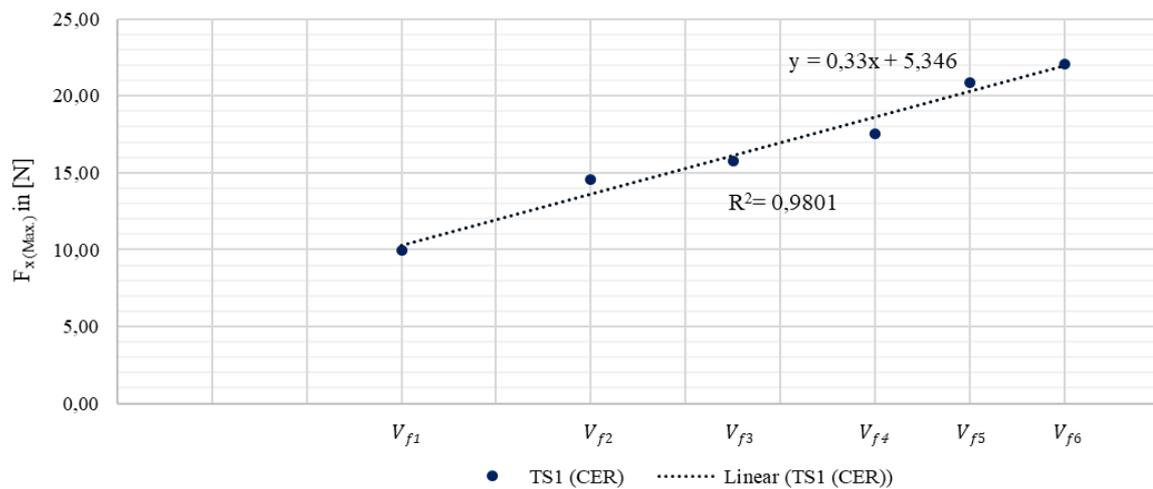


Abbildung 5.7: Lineare Regression Vorschubgeschwindigkeit und Schnittkraft $F_{x(\text{Max})}$ für TS1 (CER) an Werkstück 2

Wissenschaftliche Erkenntnisse Volumenabtrag und Schnittkraft für TS1 (CER):

Im Rahmen der Analyse der genannten Zielgrößen können folgende wissenschaftliche Erkenntnisse festgehalten werden:

- Es besteht ein Zusammenhang der Zielgrößen Volumenabtrag und Schnittkraft (Durchschnitt und Maximum). Eine höhere Schnittkraft führt zu einem erhöhten Volumenabtrag.
- Ein Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Rohrintrennung an einer geschweißten Rohrleitung kann nicht nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 5.4). Bei Durchführung der Versuchsreihe an einem nahtlosen Werkstück wird dahingegen ersichtlich, dass die Schnittkraft und damit verbunden auch der Volumenabtrag mit Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit zunimmt (vgl. Abbildung 5.5). Belegt werden kann diese Erkenntnis durch die Analyse der Standzeit von TS1 (CER) in Absatz 5.1.4.
- ➔ Ein Einfluss der Schweißnaht auf die Rohrintrennung kann nachgewiesen werden. Der einzige Unterschied zwischen Versuchsreihe 1 und 2 ist die Längsschweißnaht von Werkstück 1. Eine Begründung für die variierenden Daten der beiden Versuchsreihen liegt in der größeren Ovalität geschweißter Rohrleitungen, die durch die Herstellungsart bedingt wird. Bei einem nahtlosen Werkstück ist dahingegen eine geringere Ovalität zu beobachten und das Trennwerkzeug über die Versuchsdauer gleichmäßiger im Eingriff als an einem geschweißten Werkstück. Hierdurch wird der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Zielgrößen ersichtlich. Diese Erkenntnis liefert einen Beitrag zu **Forschungsfrage 1**.

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Zusammenhänge der Zielgrößen Volumenabtrag und Schnittkraft und der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit für eine Trennscheibe mit Schleifmittel Korund (TS2 (A)) analysiert.

Versuchsreihe 2: Volumenabtrag und Schnittkraft TS2 (A)

In Abbildung 5.8 sind die Daten des Volumenabtrages für TS1 (CER) und TS2 (A) an Werkstück 2 zu sehen. Beide Versuchsreihen wurden mit denselben Faktoren durchgeführt. Einerseits kann festgestellt werden, dass TS2 (A) bei vier der sechs untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten einen höheren Volumenabtrag als TS1 (CER) erzielt. Andererseits ist für TS2 (A) im Gegensatz zu TS1 (CER) anhand der Daten in Abbildung 5.8 kein Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Volumenabtrag zu erkennen.

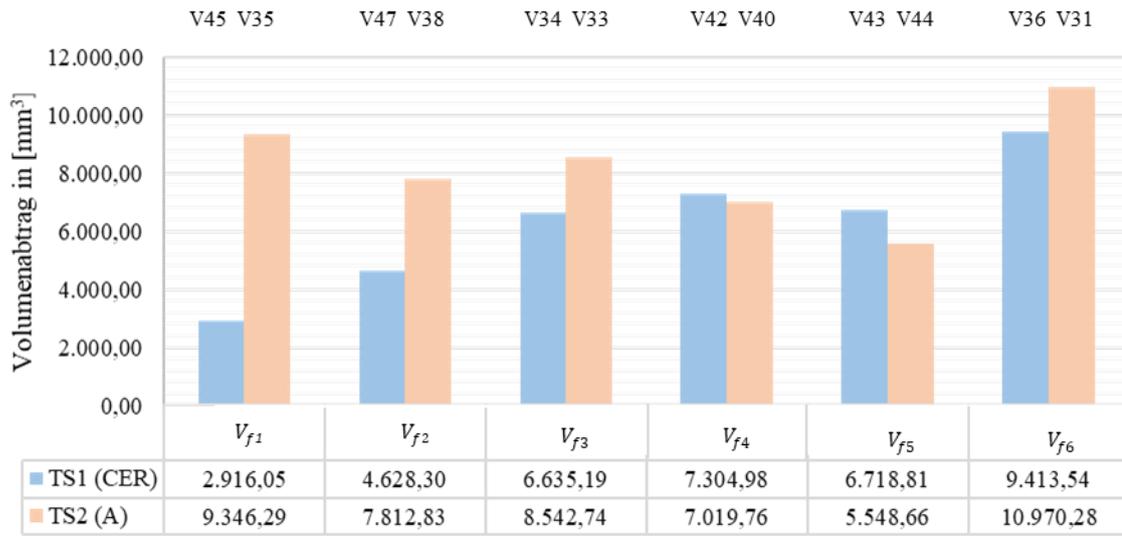


Abbildung 5.8: Vergleich Volumenabtrag TS1 (CER) und TS2 (A) an Werkstück 2

Bei einer Darstellung des Volumenabtrages in der Reihenfolge der Versuchsnummern, zu vergleichen in Abbildung 5.9, ist dahingegen ein geringerer Volumenabtrag über die Anzahl der Versuche zu erkennen.

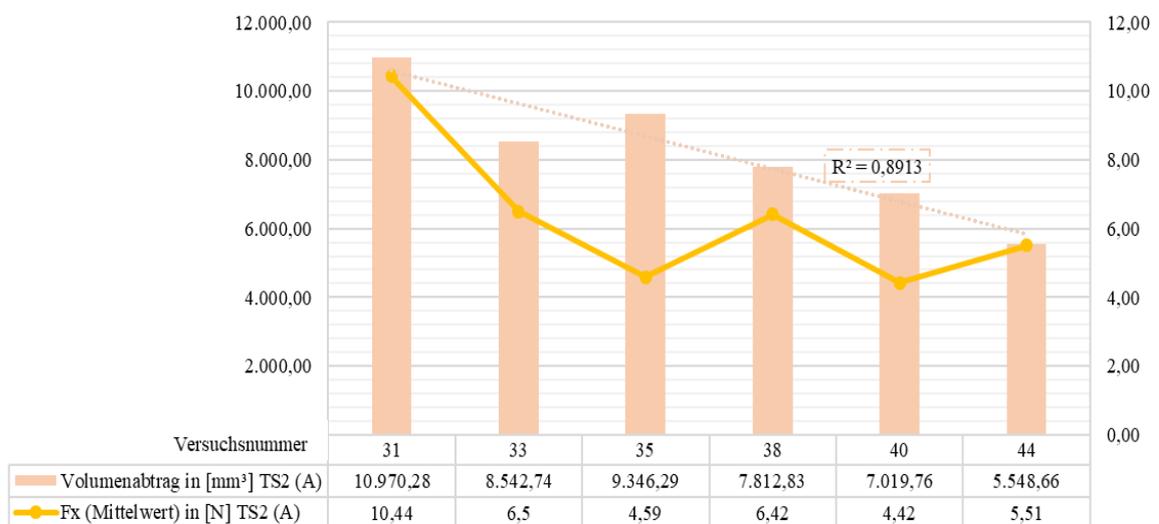


Abbildung 5.9: Vergleich Volumenabtrag und Schnittkraft TS2 (A) an Werkstück 2

Das Bestimmtheitsmaß R^2 mit 0,8913 spiegelt diesen Zusammenhang wieder. In Kombination mit Abbildung 5.8 kann durch die Datenanalyse für TS2 (A) eine Abnahme des Volumenabtrages mit der Anzahl der Rohrinnschritte festgestellt werden. Der Volumenabtrag bei einer Vorschubgeschwindigkeit von V_{f1} (9.346,29 mm³ in V35) und V_{f6} (10.970,28 mm³ in V31) befindet sich in derselben Größenordnung. Ein Grund hierfür könnte in der Abnutzung der Schleifkörner mit steigender Schleifzeit liegen. Demnach würde Korund eine geringere Standzeit als das Schleifmittel Keramik aufweisen. Weitere Untersuchungen zum Massenverlust und der Wärmeentwicklung und damit zur Standzeit der Trennscheiben werden in Absatz 5.1.4 durchgeführt.

Ebenfalls eingezeichnet ist in Abbildung 5.9 die durchschnittliche Schnittkraft F_x (Mittelwert). Wie bei TS1 (CER) ist der Volumenabtrag von der Schnittkraft abhängig und umgekehrt. Auch wenn die Schnittkraft leichten Schwankungen unterworfen ist, nimmt diese wie der Volumenabtrag über die Schleifzeit ab. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Kennzeichnung von F_x (Max.) bei TS2 (A) verzichtet. Der Zusammenhang zwischen Schnittkraft und Volumenabtrag für TS2 (A) gilt auch für Werkstück 1. Aufgrund des nachgewiesenen Einflusses der Schweißnaht auf die Rohrinntrennung bei TS1 (CER) (vgl. Abbildung 5.4), findet die Auswertung für TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 2 statt. In Abbildung 5.11 wird jedoch der Volumenabtrag für alle drei Trennscheiben an Werkstück 1 und 2 verglichen.

Durch die vorangegangene Datenauswertung können die nachfolgend zusammengefassten **wissenschaftlichen Erkenntnisse** gewonnen werden:

- Für TS2 (A) kann der Zusammenhang der Zielgrößen Volumenabtrag und Schnittkraft bestätigt werden. Die generierten Daten der beiden Zielgrößen nehmen mit Anzahl der Versuchsdurchführung ab (vgl. Abbildung 5.9).
- ➔ Für die Wahl eines geeigneten Trennwerkzeuges in **Forschungsfrage 2** ist dieser Zusammenhang von wesentlicher Bedeutung. Es soll ein kontinuierlicher Volumenabtrag unter dem Gesichtspunkt der Verschleißoptimierung erzielt werden.

Versuchsreihe 2: Volumenabtrag und Schnittkraft TS3 (D)

Wie für die Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik und Korund, hängt der Volumenabtrag für die diamantbesetzte Trennscheibe mit der Schnittkraft, zu vergleichen in Abbildung 5.10, zusammen. Es kann allerdings kein Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Volumenabtrag hergestellt werden. Sofern die beiden Ausreißer des Volumenabtrages von V46 und V37 ausgeklammert werden, ist ein annähernd konstanter Volumenabtrag über die Vorschubgeschwindigkeit zu beobachten. Ein signifikanter Einfluss der Schleifzeit wie bei TS2 (A) ist bei TS3 (D) nicht zu erkennen. Weitere Analysen hierzu folgen in Absatz 5.1.4 im Rahmen der Datenauswertung des Massenverlustes und der Wärmeentwicklung. Eine Erklärung für die schwankenden Daten könnte sein, dass TS3 (D) für eine universale Anwendung u.a. für Stein, Beton und Stahl entwickelt wurde und damit nicht explizit für (Edel-)stähle wie beispielsweise TS1 (CER) und TS2 (A).

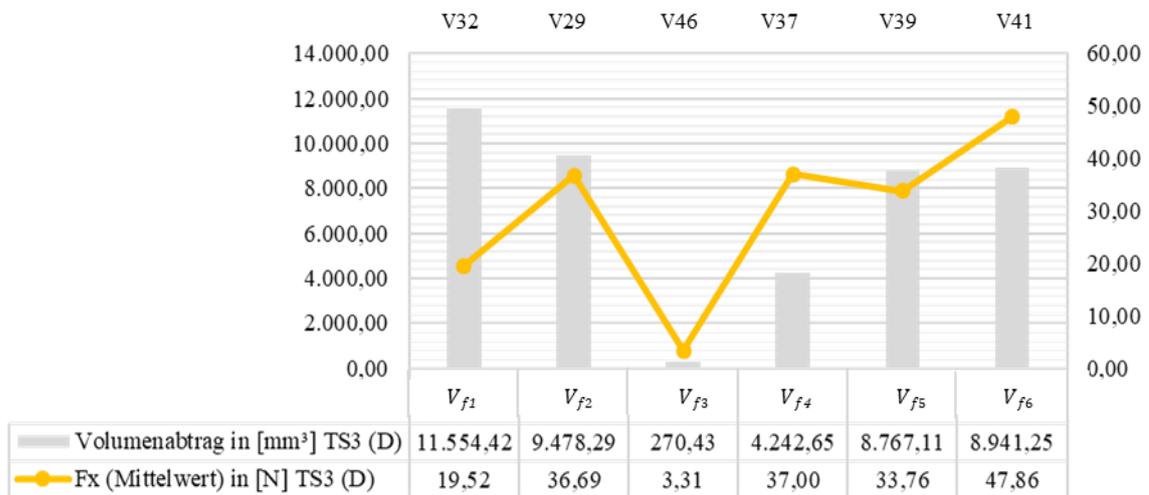


Abbildung 5.10: Vergleich Volumenabtrag und Schnittkraft TS3 (D) an Werkstück 2

Versuchsreihe 1 und 2: Vergleich Volumenabtrag TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D)

Die vorangegangene Datenauswertung lässt eine Abhängigkeit zwischen den Zielgrößen Schnittkraft und Volumenabtrag erkennen. Abschließend wird der Volumenabtrag zwischen TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) beleuchtet. In Abbildung 5.11 ist der Volumenabtrag getrennt für die drei Trennscheiben in Form von Box-Whisker Plots über die untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten von V_{f1} bis V_{f6} jeweils an Werkstück 1 und 2 dargestellt.

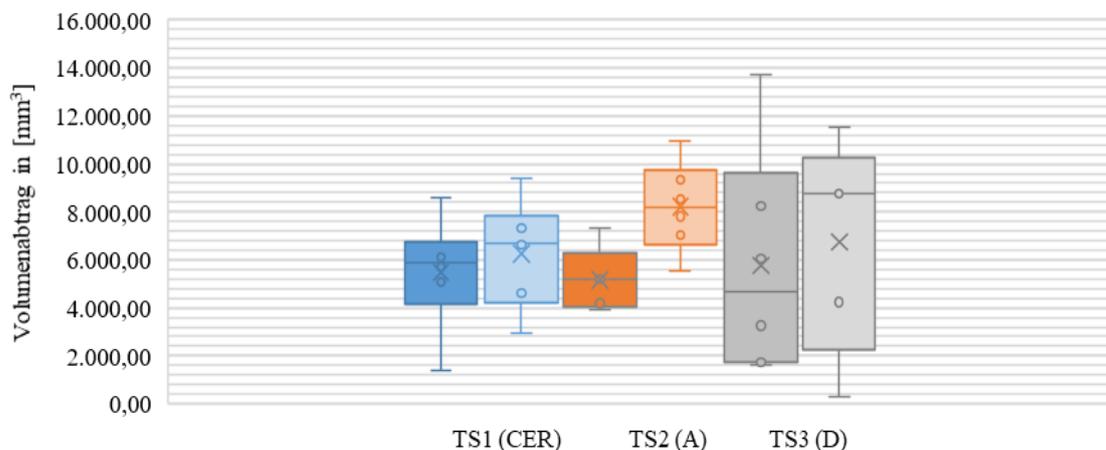


Abbildung 5.11: Vergleich des Volumenabtrags TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) jeweils an Werkstück 1 und Werkstück 2

Als Ergebnis von Versuchsreihe 1 lässt sich daraus ableiten, dass sowohl der Mittelwert von TS1 (CER) mit $5.489,63 \text{ mm}^3$ als auch der Median mit $5.882,16 \text{ mm}^3$ jeweils etwas höher sind als der Mittelwert und Median von TS2 (A). Der Mittelwert von TS2 (A) beträgt $5.172,17 \text{ mm}^3$ und der Median $5.191,36 \text{ mm}^3$. Beide Trennscheiben sind nach den generierten Daten der ersten Versuchsreihe gleichermaßen zur Rohrintrennung von geschweißten Rohrleitungen mit der Werkstoffnummer 1.451 geeignet. Um fundierte Aussagen zur Wahl eines geeigneten Trennwerkzeuges treffen zu können, muss die Standzeit der Trennscheiben untersucht werden (vgl. Absatz 5.1.4).

Anhand der Größe der Box von TS3 (D) ist eine größere Streuung des Volumenabtrages der Diamanttrennscheibe an Werkstück 1 gegenüber TS1 (CER) und TS2 (A) über die untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten zu erkennen. Weil TS3 (D) die doppelte Scheibenbreite von TS1 (CER) und TS2 (A) hat, kann der in Abbildung 5.11 dargestellte Volumenabtrag der Diamant-Trennscheibe nicht direkt mit dem der Keramik- und Korund-Trennscheibe ins Verhältnis gesetzt werden. Um einen Vergleich zu ermöglichen, wird die Annahme getroffen, dass der Volumenabtrag mit Halbierung der Scheibenbreite von 2 mm auf 1 mm um die Hälfte sinkt. Demnach würden sowohl der Mittelwert und der Median von TS3 (D) unterhalb der oben genannten Werte für die Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik und Korund liegen. Am geschweißten Werkstück 1 erzielen somit TS1 (CER) und TS2 (A) hinsichtlich des Volumenabtrages bessere Ergebnisse als TS3 (D). Dies gilt auch für den Abtrag an Werkstück 2. Ein Grund weswegen der Volumenabtrag von TS3 (D) niedriger ist als der von TS1 (CER) und TS2 (A) liegt in der Eignung der Trennwerkzeuge für Edelstahl. Während TS1 (CER) und TS2 (A) explizit für INOX bzw. Stahl entwickelt wurden, ist TS3 (D) für einen breiteren Anwendungsbereich wie z.B. für Stein, Stahl und Beton, siehe Tabelle 4.4, konzipiert. Wie in Absatz 4.2.2.1 behandelt, wurde TS3 (D) daher vorwiegend für die Trennung von in Beton verlegten Rohrleitungen ausgewählt. Weitere Angaben hierzu folgen in Versuchsreihe 5.

Unterzieht man die Daten der ersten und zweiten Versuchsreihe der drei Trennscheiben einem Vergleich zeigt sich ein Unterschied im Volumenabtrag. Der Mittelwert und Median liegen bei allen drei Trennscheiben an Werkstück 2 (nahtlos) über Werkstück 1 (geschweißt). Folglich kann der Einfluss der Schweißnaht auf die Rohrintrennung bewiesen werden.

- Zur Beantwortung von **Forschungsfrage 1** kann demnach festgehalten werden, dass sich die Herstellungsart der Werkstücke auf die Rohrintrennung auswirkt. Vor allem bei Rohrleitungen, die nur auf eine gewisse Restwanddicke getrennt werden sollen, ist die größere Ovalität geschweißter Rohrleitungen zu beachten. Weitere Einflüsse der Schweißnaht auf die Rohrintrennung können nicht festgestellt werden, Trennscheiben können die Schweißnaht vollständig trennen.

Versuchsreihe 5: TS1 (CER) und TS3 (D)

Ausgehend von den erlangten Erkenntnissen von Versuchsreihe 1 und 2, werden in Versuchsreihe 5, welche an einem einbetonierten Werkstück stattfindet, nur Versuche mit TS1 (CER) und TS3 (D) durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass der Volumenabtrag von TS2 (A) im Vergleich zu den anderen beiden Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik und Diamant über die Schleifzeit sinkt (vgl. Abbildung 5.9). Im Gegensatz zu den Versuchsreihen mit freiliegenden Werkstücken, die nur auf eine gewisse Restwanddicke durchtrennt werden, wird das einbetonierte Werkstück in Versuchsreihe 5 über die gesamte Wandstärke von 6,3 mm durchtrennt. Der Aufbau von Werkstück 5 und die geometrischen sowie werkstofftechnischen Eigenschaften sind detailliert in Absatz 4.3.2 beschrieben. Die Anbringung von Werkstück 5 am Versuchsstand sowie die Versuchsdurchführung mit TS3 (D) in V52 sind in Abbildung 5.12 zu sehen.

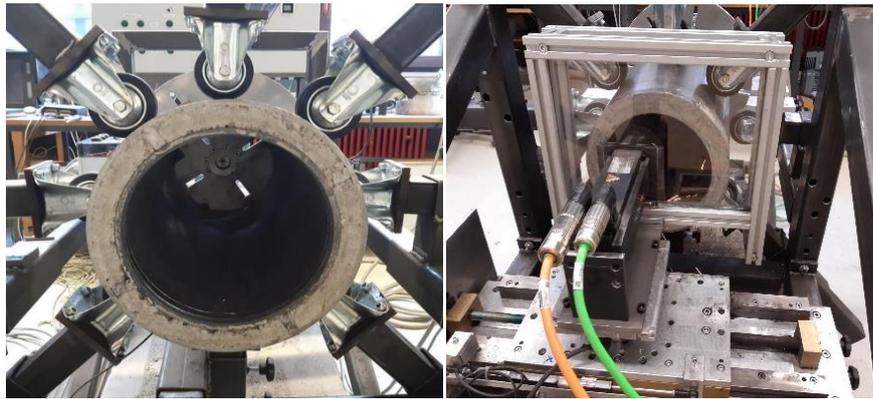


Abbildung 5.12: links: Anbringung Werkstück 5 am Versuchsstand; rechts: Versuchsdurchführung V52

An Werkstück 5 werden keine umfangreichen Versuchsreihen wie an den vorherigen Werkstücken durchgeführt. Versuchsreihe 5 dient einerseits dem Nachweis, dass mit den Maschinenparametern und den ausgewählten Trennscheiben auch Rohrleitungen in Beton durchtrennt werden können. Andererseits soll der universelle Einsatz eines Rohinntrennsystems mit Trennscheiben für freiliegende und in Beton verlegte Rohrleitungen nachgewiesen werden. Die Untersuchungen zu den Maschinenparametern erfolgten durch die vorangegangenen Versuchsreihen. Für V51 mit TS1 (CER) und für V52 mit TS3 (D) wird die Vorschubgeschwindigkeit V_{f5} gewählt.

Sowohl TS1 (CER) als auch TS3 (D) können Werkstück 5, welches eine Wandstärke von 6,3 mm hat, vollständig bis zur umgebenden Betonstruktur trennen. Die erzielte Schnitttiefe von V51 und V52 ist größer als 6,3 mm. Es entstand daher nicht nur Kontakt mit Beton, dieser wurde von beiden Trennscheiben auch abgetragen.

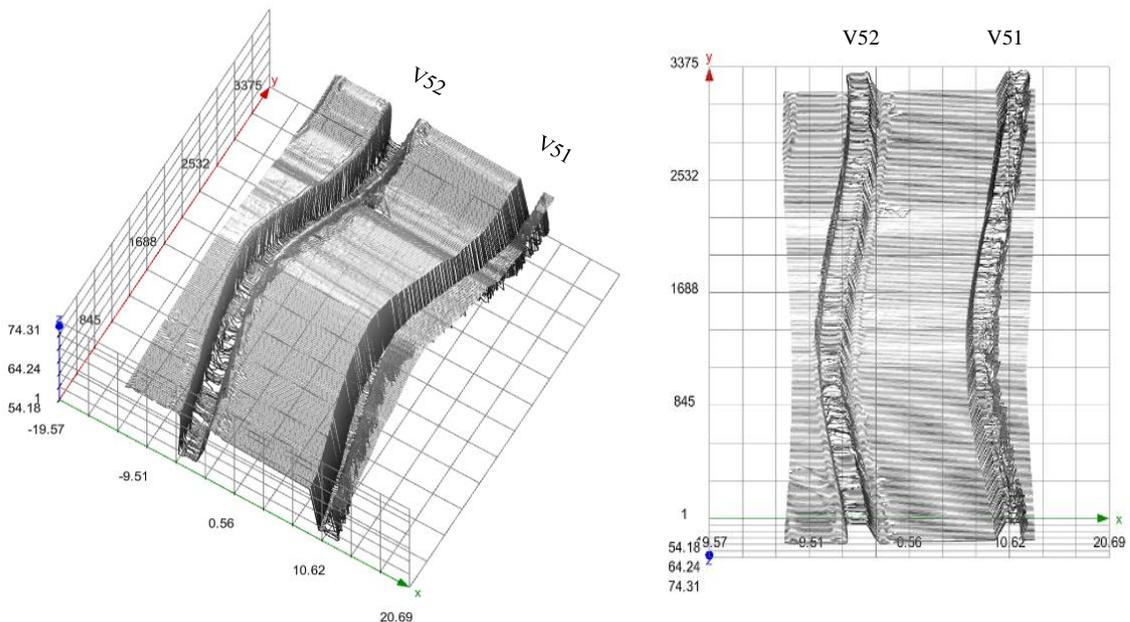


Abbildung 5.13: 3D-Darstellung Volumenabtrag TS1 (CER) - V51 und TS3 (D) - V52 in der Software „scanCONTROL 3D-View“

In der 3D-Darstellung der erzeugten Rohrinnechnitte in Abbildung 5.13 ist die Schnitttiefe für V51 und V52 auf der z-Achse dargestellt. Auf der x-Achse sind über die Messbereichshöhe des verwendeten Laser-Profil-Scanners, Modell scanCONTROL 2910-25, die zwei Versuche aufgetragen. Die y-Achse bildet die Anzahl der Profile (3.375 Profile) ab.

Bei Betrachtung des Volumenabtrages in Abbildung 5.13 wird ein kontinuierlicher Abtrag für TS1 (CER) und TS3 (D) ersichtlich. Die grundsätzliche Eignung beider Trennscheiben für einbetonierte Rohrleitungen ist somit nachgewiesen. Schaut man sich die erzielten Rohrinnechnitte in Abbildung 5.14 im Detail an, zeigt sich jedoch, dass das Schnittbild von TS3 (D) exakter ist als das von TS1 (CER). Die diamantbesetzte Trennscheibe erzeugt einen Schnitt mit einer gleichmäßigen Schnittbreite (x-Achse) über die gesamte Schnitttiefe (y-Achse). Dahingegen kann bei der Keramik-Trennscheibe mit zunehmender Schnitttiefe eine abnehmende Schnittbreite festgestellt werden. Der Grund hierfür liegt darin, dass TS3 (D) eine universale Anwendung aufweist und speziell zur Bearbeitung von Stein, Stahl und Beton entwickelt wurde.

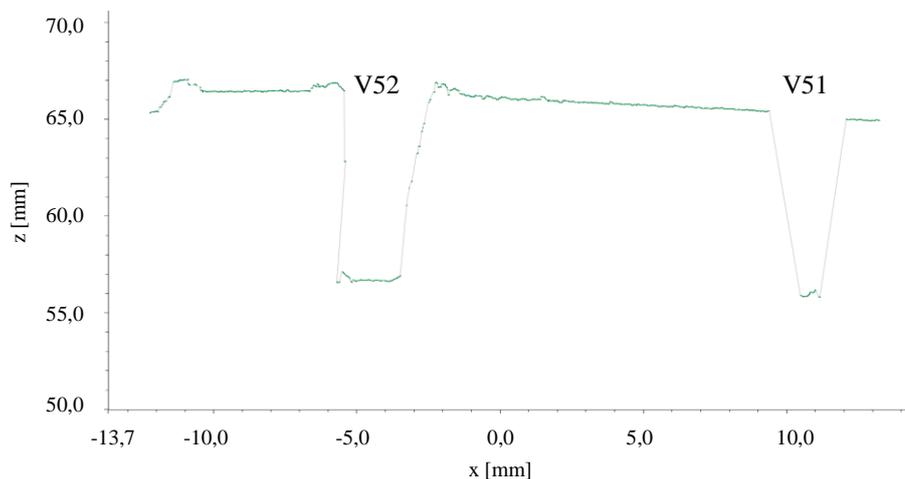


Abbildung 5.14: Vergleich Schnittbreite und Schnitttiefe TS3 (D) - V51 und TS1 (CER) - V52

Als Ergebnis von Versuchsreihe 5 kann die grundsätzliche Eignung beider Trennscheiben für die Rohrinneentrennung von in Beton verlegte Rohrleitungen festgehalten werden. TS3 (D) erzielt jedoch einen gleichmäßigeren Abtrag und ist damit TS1 (CER) vorzuziehen. Dies sollte bei der Wahl einer geeigneten Trennscheibe für die Rohrinneentrennung beachtet werden und fließt in die Beantwortung von **Forschungsfrage 1 und 2** mit ein.

Zusammenfassende wissenschaftliche Erkenntnisse Schnittkraft und Volumenabtrag:

Im Rahmen der Analyse des Volumenabtrages für TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) können folgende Erkenntnisse erzielt werden:

- Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik und Korund erzielen bei der Rohrinneentrennung von Chrom-Nickel-Edelstählen (hier: Werkstoffnummer: 1.4541) einen höheren Volumenabtrag als diamantbesetzte Trennscheiben (vgl. Abbildung 5.11).

- ➔ Diese Erkenntnis fließt in die Wahl eines Trennwerkzeugs zur Rohrintrennung in **Forschungsfrage 2** ein.
- Bei Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik ist ein Anstieg des Volumenabtrages mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit zu beobachten (vgl. Abbildung 5.5)
- Bei Trennscheiben mit Schleifmittel Korund wirkt sich vorwiegend die Schleifzeit auf den Volumenabtrag aus (vgl. Abbildung 5.9).
- Bei Trennscheiben mit Schleifmittel Diamant kann kein signifikanter Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf den Volumenabtrag festgestellt werden (vgl. Abbildung 5.10). Um die Unterschiede im Volumenabtrag zwischen den Schleifmitteln Keramik, Korund und Diamant erklären zu können, sind weitere Untersuchungen zur Standzeit der Trennscheibe notwendig. Diese folgen in Absatz 5.1.4.
- Bei nahtlosen Rohrleitungen wird ein höherer Volumenabtrag als bei geschweißten Rohrleitungen erzielt (vgl. Abbildung 5.11). Zurückzuführen ist dies auf die Herstellungsart und damit auf die idealere Rundheit von nahtlosen Rohren gegenüber Rohrleitungen mit einer Längsschweißnaht. Ein Einfluss der Längsschweißnaht auf den Volumenabtrag bei der Rohrintrennung konnte damit nachgewiesen werden.
- ➔ Hiermit kann ein Beitrag zur Beantwortung von **Forschungsfrage 1** geliefert werden.

Des Weiteren können durch das Hinzuziehen der **Zielgröße Schnittkraft** weitere Zusammenhänge hinsichtlich des Volumenabtrages identifiziert werden:

- Die Schnittkraft (Durchschnitt und Maximum) steigt mit einem erhöhten Volumenabtrag. Umgekehrt gilt, dass die Schnittkraft (Durchschnitt und Maximum) mit einem abnehmenden Volumenabtrag sinkt. Eine Abhängigkeit der Zielgrößen Volumenabtrag und Schnittkraft konnte für die Schleifmittel Keramik, Korund und Diamant nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 5.4, Abbildung 5.5, Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10)
- ➔ Mit dieser Erkenntnis und dem Nachweis des Einflusses der Längsschweißnaht auf die Rohrintrennung können die Schwankungen der Schnittkraft F_x (Mittelwert) an Werkstück 1 (geschweißt) in Abbildung 5.3 erklärt werden.

Für die Trennung von **in Beton verlegte Rohrleitungen** gilt:

- Die grundsätzliche Eignung von TS1 (CER) und TS3 (D) für die Rohrintrennung von einbetonierten Rohrleitungen am Werkstoff P235GH konnte bestätigt werden. Für die Trennung einbetonierter Rohrleitungen ist dennoch TS3 (D) vorzuziehen. Mit dieser Trennscheibe kann ein gleichmäßigerer Schnitt als mit TS1 (CER) erreicht werden (vgl. Abbildung 5.14). Dies ist für den anschließenden Ausbau des abgetrennten Rohrsegmentes entscheidend.
- ➔ Diese Erkenntnis dient zur Beantwortung von **Forschungsfrage 1 und 2**.

Es folgt die Analyse des Massenverlustes und der Wärmeentwicklung für Trennscheiben.

5.1.4 Ergebnisse und Auswertung Massenverlust und Wärmeentwicklung

Versuchsreihe 1 und 2: Vergleich Massenverlust TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D)

In **Forschungsfrage 2** soll ein spanendes Trennwerkzeug zur Rohrintrennung unter dem Gesichtspunkt der Verschleißoptimierung identifiziert werden. Folglich sind die nachfolgenden Ergebnisse zum Massenverlust bzw. zur Wärmeentwicklung an der Werkzeugschneide maßgeblich zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage.

Um einen Vergleich zu der Analyse der bisherigen Zielgrößen herstellen zu können, sind in Abbildung 5.15 Box-Whisker-Plots für den Massenverlust in [g] für TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D)²⁵ über die Vorschubgeschwindigkeit V_{f1} bis V_{f6} an Werkstück 1 und 2 zu sehen. Es wird ersichtlich, dass:

$$\text{Massenverlust TS 3 (D)} < \text{Massenverlust TS1 (CER)} < \text{Massenverlust TS2 (A)}$$

Sowohl der Mittelwert als auch der Median an Werkstück 1 und 2 von TS2 (A) sind höher als Mittelwert und Median von TS1 (CER) und TS3 (D). Zudem ist die Streuung von TS2 (A) über die Vorschubgeschwindigkeiten am größten.

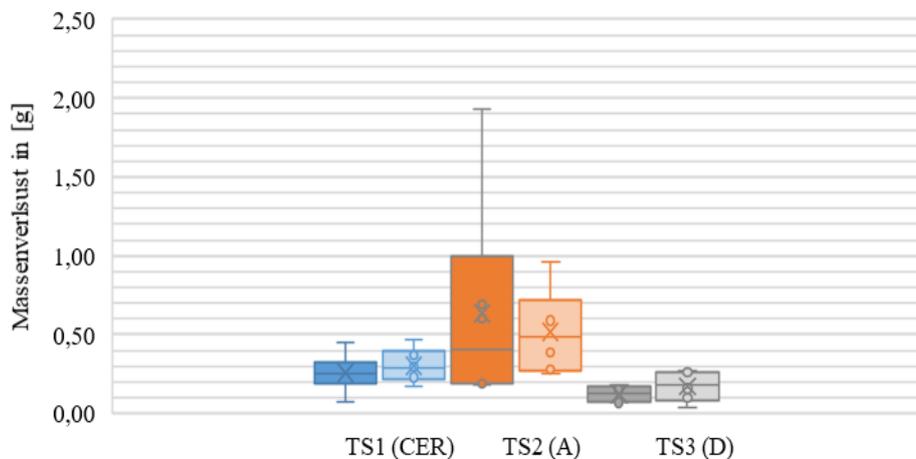


Abbildung 5.15: Vergleich Massenverlust TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 1 und 2

Eine Begründung hierfür liegt einerseits in der **Härte** der Schleifmittel. In Absatz 4.2.2 wurde aufgezeigt, dass Diamant mit einer Härte von 5.000 - 7.000 HK 0,1 das Schleifmittel mit der größten Härte und damit einhergehend die größte Verschleißfestigkeit aufweist. Keramik hat eine Härte von 2.450 - 3.000 HK 0,1 und Korund von 1.850 - 2.000 HK 0,1. Korund-Trennscheiben weisen daher die niedrigste Verschleißfestigkeit der drei untersuchten Schleif-

²⁵ Die unterschiedliche Scheibenbreite der Trennscheiben muss bei einem direkten Vergleich der Massenverluste berücksichtigt werden. Wie in Tabelle 4.4 aufgeführt, besitzt TS3 (D) eine Scheibenbreite von 2 mm, TS1 (CER) und TS2 (A) jeweils eine Breite von 1 mm. Obwohl TS3 (D) die doppelte Scheibenbreite aufweist, ist der Massenverlust am geringsten.

mittel auf. Bestätigt werden kann dies dadurch, dass der erzielte Massenverlust von Trennscheiben mit dem Schleifmittel Korund am größten ist.

Neben der Härte der Schleifmittel trägt auch der **Selbstschärfungsprozess** von Keramik zu einem kleineren Massenverlust im Vergleich zu Korund bei. In Abbildung 5.16 ist beispielhaft der Selbstschärfungsprozess über die Schleifzeit eines Keramikorns dargestellt. Die Schleifkräfte führen dazu, dass die durch einen Sinterungsprozess miteinander verbundenen, feinen Aluminiumoxid-Kristalle durch den Schleifprozess herausbrechen und neue, scharfe Schneidkanten ausbilden [98, S. 23]. Über die Schleifzeit betrachtet sind bei Keramik-Trennscheiben daher mehr scharfe und spitze Schneidkanten im Einsatz wie im vorliegenden Fall bei Korund. Dies wirkt sich positiv auf die Schleifleistung und den Werkzeugverschleiß aus. [143]

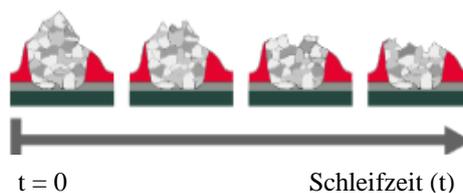


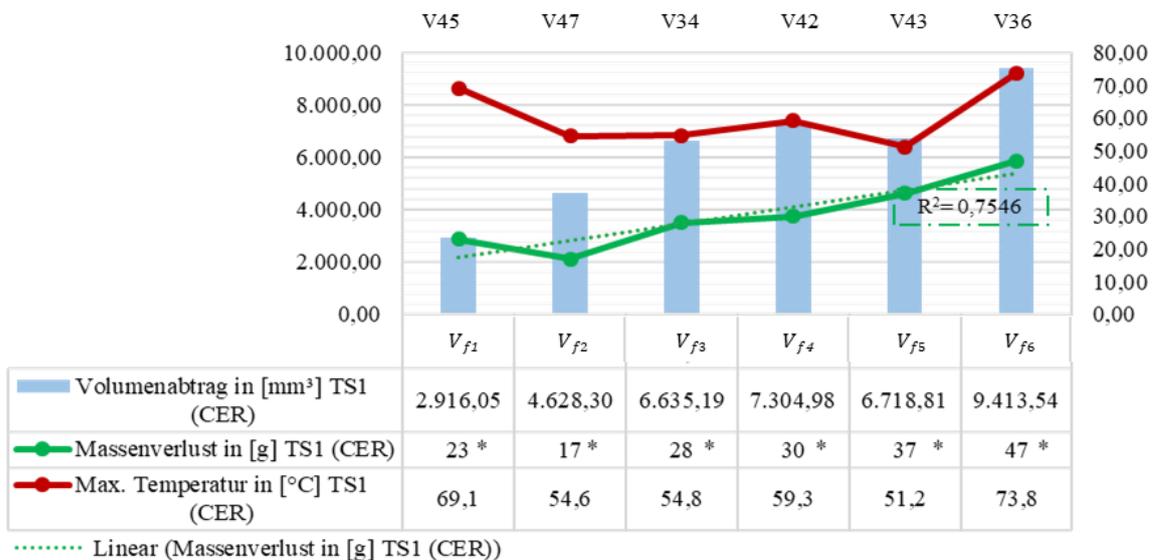
Abbildung 5.16: Selbstschärfung Keramikorn über die Schleifzeit [98, S. 23]

Des Weiteren lässt sich der unterschiedliche Massenverlust der drei Schleifmittel mit der **Wärmeentwicklung an den Trennscheiben** erklären. Um den Einfluss der Schweißnaht auf die Rohrintrennung und den hieraus variierenden Volumenabtrag auszublenken, wird nachfolgend gezielt die zweite Versuchsreihe (nahtloses Werkstück) analysiert.

Versuchsreihe 2: Vergleich Massenverlust und Wärmeentwicklung TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D)

Für TS1 (CER) kann ein eindeutiger Zusammenhang erkannt werden. Gemäß Abbildung 5.17 kann abgeleitet werden, dass aus einer Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit ein größerer Massenverlust und eine steigende Wärmeentwicklung²⁶ an der Werkzeugschneide resultieren. Im vorangegangenen Absatz konnte zudem eine Abhängigkeit zwischen den Schnittkräften (Durchschnitt und Maximum) und Vorschubgeschwindigkeit hergeleitet werden. Wie aufgezeigt, ist das Schleifmittel Keramik selbstschärfend. Wird mehr Volumen abgetragen, werden demnach auch mehr Schleifkörner abgenutzt, die nachgeschliffen werden müssen, um diesen Volumenabtrag erzielen zu können. Damit ist jedoch auch ein erhöhter Massenverlust der Trennscheibe zu beobachten. Die Standzeit der Keramik-Trennscheibe sinkt daher infolge einer erhöhten Temperaturentwicklung und zunehmenden Massenverlustes. Die Vorschubgeschwindigkeit ist dementsprechend unter Abwägung der Standzeit der Trennscheibe und dem Volumenabtrag zu wählen.

²⁶ Für V45 ist diese Aussage nicht zutreffend, da die gemessene Maximaltemperatur zu hoch ist. Hierbei handelt es sich um einen Ausreißer. Die restlichen Zielgrößen stimmen mit der getätigten Aussage überein.



*: Zur besseren Visualisierung der Zusammenhänge der Zielgrößen ist der Massenverlust um den Faktor 100 vergrößert.

Abbildung 5.17: Vergleich Massenverlust, maximale Temperatur und Volumenabtrag TS1 (CER) an Werkstück 2

Mathematische Auswertung Vorschubgeschwindigkeit und Massenverlust TS1 (CER):

Das Bestimmtheitsmaß R^2 mit 0,7546 liefert eine gute Annäherung an die Trendlinie zwischen Massenverlust und Vorschubgeschwindigkeit für TS1 (CER). Der Korrelationskoeffizient r [-] nach Pearson und das Bestimmtheitsmaß R^2 [-] für Vorschubgeschwindigkeit und Massenverlust für TS1 (CER) an Werkstück 2 errechnet sich mit den Mittelwerten²⁷ $\bar{x} = 34,58$ Hz und $\bar{y} = 0,30$ g sowie den Angaben aus Tabelle 5.6 nach (1.4) bzw. (1.3) zu:

$$r = \frac{68,95 - 6 \cdot 34,58 \cdot 0,30}{\sqrt{8.031,25 - 6 \cdot 34,58^2 \cdot 0,61 - 6 \cdot 0,30^2}} = 0,8687 \quad (1.4)$$

$$R^2 = 0,8687^2 = 0,7546 \quad (1.3)$$

Tabelle 5.6: Angaben zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für Vorschubgeschwindigkeit und Massenverlust (TS1 (CER)/Werkstück 2)

n [-]	x [Hz]	x ² [Hz ²]	y [g]	y ² [g ²]	x*y [Hz*g]
1	15,00	225,00	0,23	0,05	3,45
2	25,00	625,00	0,17	0,03	4,25
3	32,50	1.056,25	0,28	0,08	9,10
4	40,00	1.600,00	0,30	0,09	12,00
5	45,00	2.025,00	0,37	0,14	16,65
6	50,00	2.500,00	0,47	0,22	23,50
Σ	207,50	8.031,25	1,82	0,61	68,95

²⁷ Die arithmetischen Mittel \bar{x} und \bar{y} berechnen sich mit Gleichung (1.5) bzw. (1.6) und Tabelle 5.6.

Der Massenverlust von TS1 (CER) in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit lässt sich durch die lineare Funktion mit:

$$y = 0,007x + 0,06$$

berechnen. Die Gerade der Trendlinie einschließlich der generierten der zweiten Versuchsreihe unter Angabe des Bestimmtheitsmaßes zeigt Abbildung 5.18.

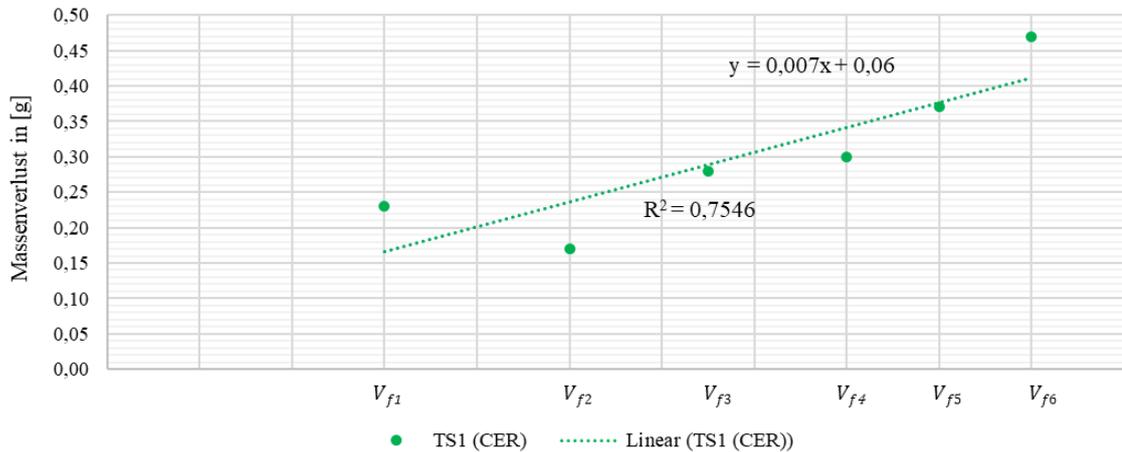
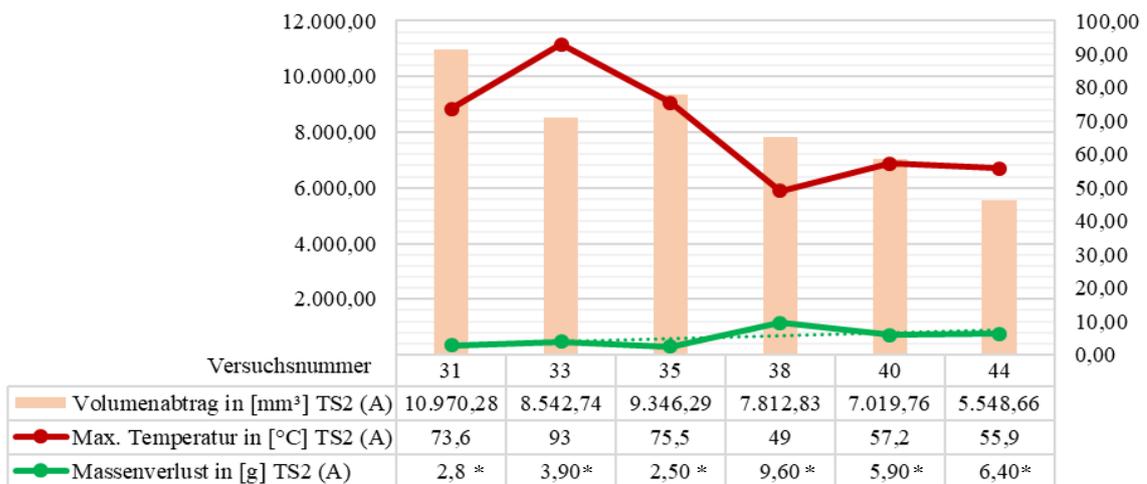


Abbildung 5.18: Lineare Regression Vorschubgeschwindigkeit und Massenverlust für TS1 (CER) an Werkstück 2

Für TS2 (A) ist in Abbildung 5.19 der Massenverlust und die Temperaturentwicklung über die Schleifzeit, d.h. sortiert nach der Reihenfolge der Versuche einschließlich des Volumenabtrages, dargestellt. Anhand des Diagramms kann die Annahme aus dem vorherigen Kapitel bestätigt werden, dass der Volumenabtrag mit Zunahme der Schleifzeit sinkt, da der Massenverlust der Scheibe zunimmt. Ein Abstumpfen der Schleifkörner über die Schleifzeit kann somit belegt werden. Hier liegt ein wesentlicher Unterschied von TS2 (A) gegenüber TS1 (CER) und TS3 (D).

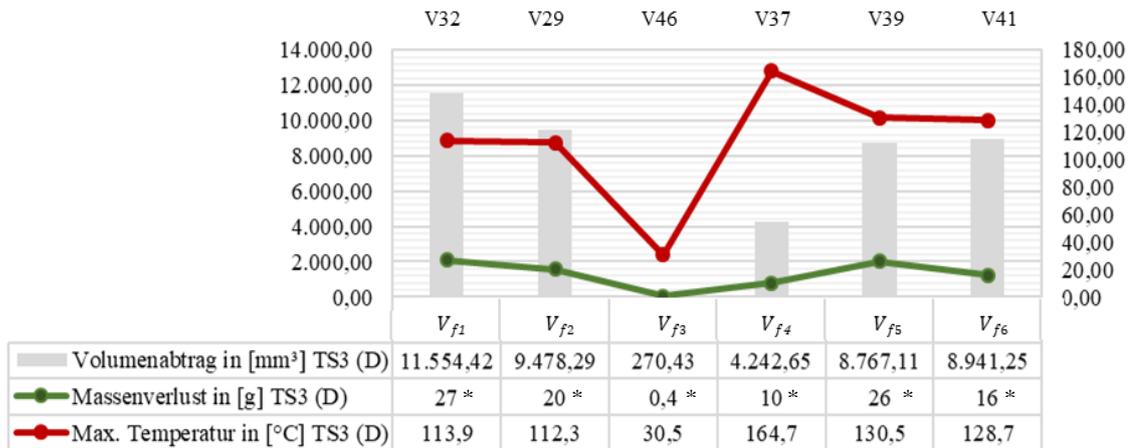


..... Linear (Massenverlust in [g] TS2 (A))

*: Zur besseren Visualisierung der Zusammenhänge der Zielgrößen ist der Massenverlust um den Faktor 10 vergrößert.

Abbildung 5.19: Vergleich der Zielgrößen Massenverlust, maximale Temperatur und Volumenabtrag TS2 (A) an Werkstück 2

Für die diamantbesetzte Trennscheibe kann ebenfalls festgehalten werden, dass der Verlauf für Massenverlust, Temperatur und Volumenabtrag übereinstimmen. Zieht man Abbildung 5.10 heran, gilt dies auch für die Schnittkräfte.



*: Zur besseren Visualisierung der Zusammenhänge der Zielgrößen ist der Massenverlust um den Faktor 100 vergrößert.

Abbildung 5.20: Vergleich der Zielgrößen Massenverlust, maximale Temperatur und Volumenabtrag TS3 (D) an Werkstück 2

Im Vergleich zu TS1 (CER) und TS2 (A) sind die Temperaturen an TS3 (D) jedoch deutlich höher. Sichtbar wird dies durch die Whisker-Box-Plots in Abbildung 5.21.

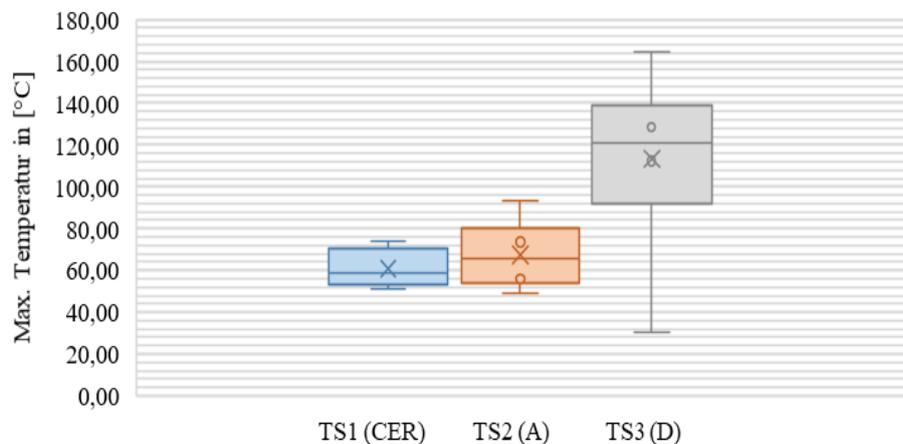


Abbildung 5.21: Wärmeentwicklung von TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 2

Die Maximaltemperaturen für Keramik-Trennscheiben über die Vorschubgeschwindigkeiten von V_{f1} bis V_{f6} belaufen sich auf 51,2 - 73,8 °C und die der Korund-Trennscheiben auf 49,0 - 93,0 °C. Infolge der höheren Wärmeentwicklung bei Trennscheiben mit Korund gegenüber einem Keramik Korn stumpft TS2 (A) schneller ab und erzielt einen höheren Massenverlust als TS1 (CER). Zusammen mit den Daten in Abbildung 5.15 wird eine Übereinstimmung der Daten des Massenverlustes mit denen der Temperaturentwicklung erzielt. Es wird daher belegt, dass die Temperatur an der Schneide einen direkten Einfluss auf den Massenverlust und damit auf

die Standzeit der Schleifmittel Keramik und Korund während der Rohrintrennung hat. Zusammengefasst gilt:

$$\begin{aligned} & \text{Wärmeentwicklung TS1 (CER)} < \text{Wärmeentwicklung TS2 (A)} \\ & \text{Massenverlust TS1 (CER)} < \text{Massenverlust TS2 (A)} \\ & \text{Standzeit TS1 (CER)} > \text{Standzeit TS2 (A)} \end{aligned}$$

Eine höhere Wärmetwicklung verursacht grundsätzlich einen häufigeren Werkzeugwechsel, womit nicht nur Kosten für ein neues Werkzeug, sondern im Bereich der Kerntechnik auch weitere radioaktiv verunreinigte Gegenstände produziert werden. Bei der Rohrintrennung sollten daher bei Keramik- und Korund-Scheiben Vorschubgeschwindigkeiten, die eine hohe Wärmeentwicklung und damit einen hohen Massenverlust erzielen, vermieden werden. Dies ist wichtig zur Beantwortung von Forschungsfrage 3.

Infolge des identischen Aufbaus von Trennscheiben mit konventionellen Schleifmitteln wie Keramik und Korund ist ein Vergleich der Wärmeentwicklung von TS1 (CER) und TS2 (A) möglich. In Absatz 4.2.2 wurde erläutert, dass sich der Aufbau diamantbesetzter Trennscheiben von diesen unterscheidet, wodurch ein Vergleich der entstehenden Maximaltemperaturen aller drei Schleifmittel nur schwer möglich ist. Die Maximaltemperaturen an TS3 (D) belaufen sich bei Vorschubgeschwindigkeiten von V_{f1} bis V_{f6} auf bis zu 164,7 °C. Die verwendete Diamant-Trennscheibe erzielt demnach deutlich höhere Temperaturen als Keramik- und Korund-Trennscheiben, stellt aber das Schleifmittel mit dem geringsten Massenverlust, vgl. Abbildung 5.15, dar.

Zurückzuführen ist dies u.a. auf die unterschiedliche Wärmeverteilung der verwendeten Trennscheiben. Wie anhand des Wärmebildes für TS1 (CER) und TS2 (A) in Abbildung 5.22 zu sehen ist, befindet sich die als Hotspot (HS) gekennzeichnete Maximaltemperatur bei beiden Trennscheiben jeweils an der Werkzeugschneide und beträgt 59,3 °C bzw. 57,2 °C.

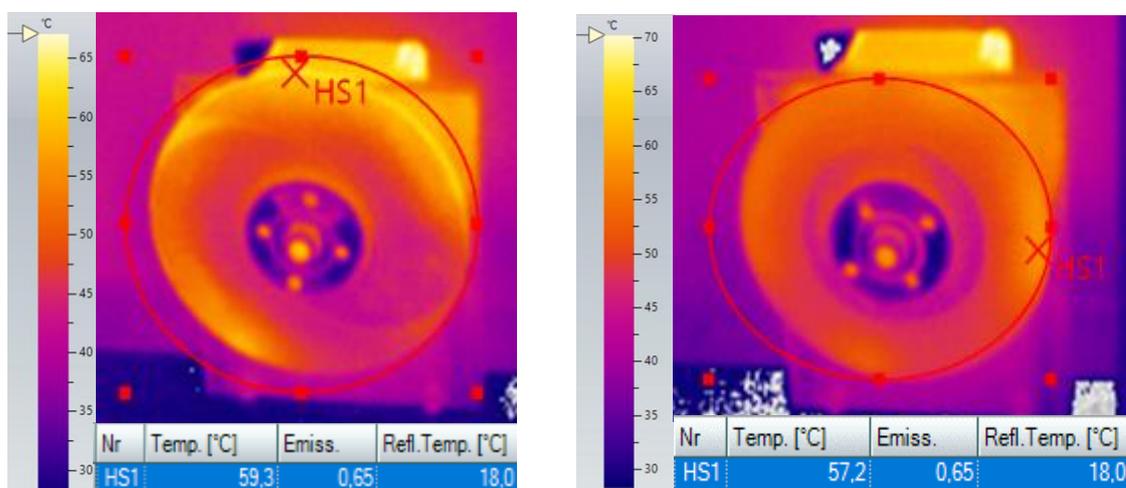


Abbildung 5.22: Wärmebild mit Hotspot bei V_{f4} - links: TS1 (CER) - Versuch 42; rechts: TS2 (A) - Versuch 40, Werkstück 2

Bei TS3 (D) ist dahingegen die höchste Wärmeentwicklung nicht auf dem Diamantsegment und damit nicht an der Werkzeugschneide, sondern auf dem Stammbblatt aus gehärtetem oder gewuchtetem Werkzeugstahl zu beobachten. Abbildung 5.23 zeigt ein Wärmebild für die Diamant-Trennscheibe bei Vorschub V_{f4} mit einem Hotspot von 164,7 °C. Grund für diese Wärmeverteilung stellt u.a. die normale Segmentierung (C3), d.h. schmale Schlitzung mit einer Hinterlochung, der Scheibe dar. Wie in Absatz 4.2.2.1 im Rahmen der Auswahl der Trennscheiben erläutert wurde, führt diese Stammbblattgeometrie u.a. zu einer guten Hitzeverteilung [102, S. 276].

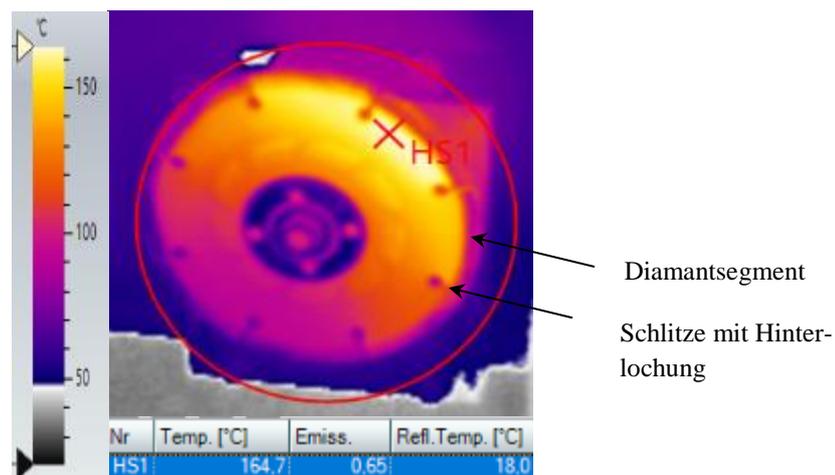


Abbildung 5.23: Wärmebild mit Hotspot bei V_{f4} - TS3 (D) - Versuch 37, Werkstück 2

Die Ausführungen zeigen, dass die erzielten Maximaltemperaturen an den drei untersuchten Trennscheiben nicht miteinander verglichen werden können. Dies ist lediglich bei Schleifmittel Keramik und Korund möglich.

Wissenschaftliche Erkenntnisse Massenverlust und Wärmeentwicklung

Abschließend können die Erkenntnisse zur Standzeit der untersuchten Schleifmittel anhand der Zielgrößen Massenverlust und Wärmeentwicklung wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Massenverluste der Trennscheiben unterscheiden sich bei der Rohrintrennung je nach Schleifmittel (vgl. Abbildung 5.15). Zurückzuführen ist dies u.a. auf die Härte des verwendeten Schleifmittels sowie auf den Selbstschärfungsprozess der Schleifkörner. Es gilt:

$$\text{Massenverlust Schleifmittel Diamant} < \text{Massenverlust Schleifmittel Keramik} < \text{Massenverlust Schleifmittel Korund}$$

- Unter Berücksichtigung dessen, dass Trennscheiben mit Schleifmittel Korund einen höheren Massenverlust aufweisen und der Volumenabtrag über die Anzahl der Versuche, zu vergleichen in Abbildung 5.9, abnimmt, sind Trennscheiben aus Keramik für die Rohrintrennung von freiliegenden Rohrleitungen zu bevorzugen.
- Diese Erkenntnis ist relevant zur Beantwortung von **Forschungsfrage 2**.

- Bei TS1 (CER) steigt der Volumenabtrag mit Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit und der damit einhergehenden erhöhten Schnittkraft (vgl. Abbildung 5.5). Hinsichtlich des Volumenabtrages sind daher höhere Vorschubgeschwindigkeiten für TS1 (CER) ratsam. Mit einer höheren Vorschubgeschwindigkeit ist jedoch ein höherer Massenverlust und eine höhere Wärmeentwicklung verbunden (vgl. Abbildung 5.17). D.h. die Standzeit von TS1 (CER) sinkt bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten. Die Vorschubgeschwindigkeit ist daher unter Berücksichtigung und Abwägung der genannten Zielgrößen zu wählen.
- ➔ Dieser Zusammenhang muss bei der Wahl der Betriebsparameter in **Forschungsfrage 3** berücksichtigt werden.
- Durch den größeren Massenverlust von TS2 (A) gegenüber TS1 (CER) und TS3 (D) geht eine niedrigere Standzeit für TS2 (A) einher (**Forschungsfrage 2**). Dies wiederum führt dazu, dass häufigere Scheibenwechsel im Vergleich zu Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik und Diamant notwendig sind. Hierdurch steigen nicht nur die Anschaffungskosten, sondern auch die anfallenden Abfallmassen.
- Bei Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik und Korund tritt die maximal gemessene Temperatur jeweils an der Werkzeugschneide auf (vgl. Abbildung 5.22). Bei diamantbesetzten Trennscheiben erhitzt sich dahingegen das Stammblatt mehr als das Diamantsegment (vgl. Abbildung 5.23). Begründet werden kann diese Wärmeverteilung durch die normale Segmentierung (C3) der verwendeten Trennscheibe.
- ➔ Hinsichtlich der Standzeit der untersuchten Trennscheiben ist vorzugsweise das Schleifmittel Keramik zur Rohrrinntrennung freiliegender Rohrleitungen zu wählen (**Forschungsfrage 2**).

5.1.5 Ergebnisse und Auswertung Staubkonzentration

Wie bereits erwähnt, spielen die freiwerdenden Staubkonzentrationen aus Gründen der Arbeitssicherheit eine zentrale Rolle. In der Datenauswertung wird daher untersucht, ob die geltenden Grenzwerte gemäß TRGS, diese wurden in Absatz 4.5.4 behandelt, unter- bzw. überschritten werden und ob Schutzmaßnahmen für das Bedienpersonal während der Rohrrinntrennung zu ergreifen sind.

Versuchsreihe 1: Vergleich TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D):

Durch die Auswertung der Daten in der Software „Casella insight“, ergeben sich die in Tabelle 5.7 aufgeführten durchschnittlichen und maximalen Staubkonzentrationen in $[\text{mg}/\text{m}^3]$ für TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) über die Vorschubgeschwindigkeiten V_{f1} bis V_{f6} an Werkstück 1.

Tabelle 5.7: Staubkonzentration (Durchschnitt und Maximum) von TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 1

Eingangsgrößen					Ausgangsgrößen	
Versuchsreihe	Versuchsnummer	Trennscheibe	Werkstück	Vorschubgeschwindigkeit [-]	Durchschnitt Staubkonzentration in mg/m ³	Maximum Staubkonzentration in mg/m ³
Versuchsreihe 1	12	TS1 (CER)	1	V_{f1}	0,92	7.422,00
Versuchsreihe 1	24	TS1 (CER)	1	V_{f2}	1.908,00	14.915,00
Versuchsreihe 1	16	TS1 (CER)	1	V_{f3}	0,12	2.500,00
Versuchsreihe 1	22	TS1 (CER)	1	V_{f4}	1.755,00	11.468,00
Versuchsreihe 1	26	TS1 (CER)	1	V_{f5}	1.958,00	30.541,00
Versuchsreihe 1	17	TS1 (CER)	1	V_{f6}	1.651,00	13.941,00
Versuchsreihe 1	21	TS2 (A)	1	V_{f1}	1.330,00	25.000,00
Versuchsreihe 1	19	TS2 (A)	1	V_{f2}	0,21	4.858,00
Versuchsreihe 1	10	TS2 (A)	1	V_{f3}	1.387,00	9.122,00
Versuchsreihe 1	27	TS2 (A)	1	V_{f4}	1.989,00	23.464,00
Versuchsreihe 1	15	TS2 (A)	1	V_{f5}	1.143,00	16.313,00
Versuchsreihe 1	23	TS2 (A)	1	V_{f6}	5.933,00	29.700,00
Versuchsreihe 1	8	TS3 (D)	1	V_{f1}	0,17	4.571,00
Versuchsreihe 1	14	TS3 (D)	1	V_{f2}	0,07	3.194,00
Versuchsreihe 1	20	TS3 (D)	1	V_{f3}	0,15	2.500,00
Versuchsreihe 1	18	TS3 (D)	1	V_{f4}	0,06	12.649,00
Versuchsreihe 1	25	TS3 (D)	1	V_{f5}	0,63	3.598,00
Versuchsreihe 1	11	TS3 (D)	1	V_{f6}	0,12	5.520,00

Anhand der grafischen Darstellung der durchschnittlichen und maximalen Staubkonzentrationen für TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) in Abbildung 5.24 an Werkstück 1 werden die Unterschiede zwischen den drei Schleifmitteln ersichtlich. Da die Messungen an Werkstück 1 durchgeführt wurden, sind die Daten der Staubkonzentrationen Schwankungen unterworfen. In Absatz 5.1.3 wurde der Einfluss der Schweißnaht auf die Rohrintrennung nachgewiesen. Sowohl die durchschnittlichen als auch maximalen Staubkonzentrationen von TS3 (D) sind geringer als die gemessenen Konzentrationen der Keramik- und Korund-Trennscheibe.²⁸

²⁸ Vgl. Lang [156, S. 27].

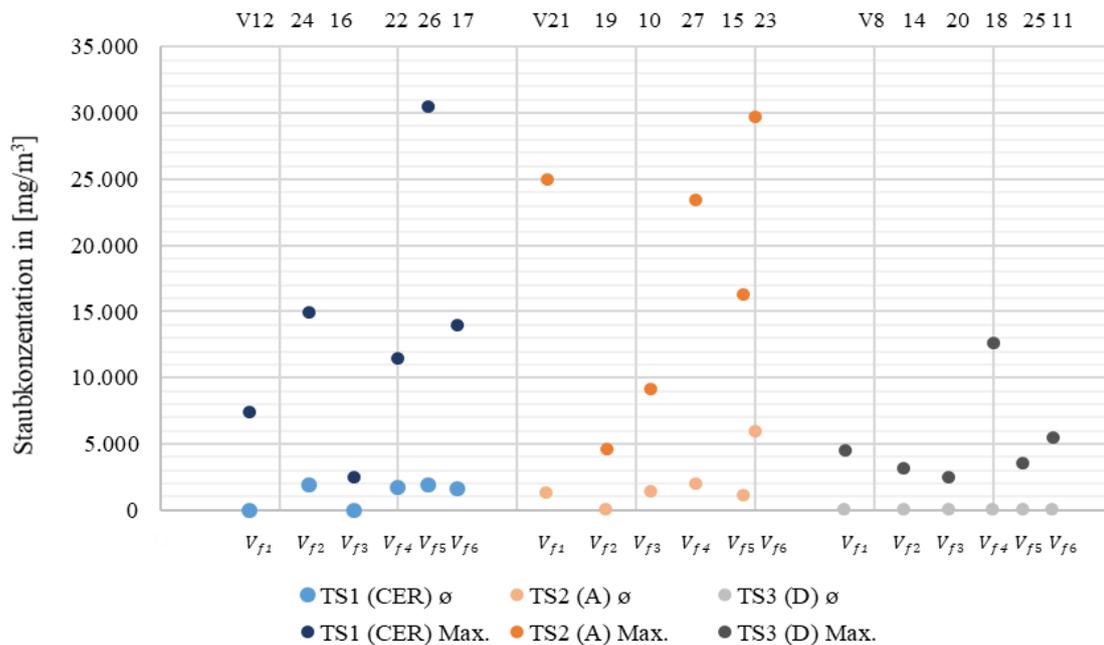


Abbildung 5.24: Vergleich Staubkonzentration TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 1

Über die Anzahl der Versuche von Versuchsreihe 1 hinweg liegt der Median und der Mittelwert der maximalen Staubkonzentrationen von TS2 (A) deutlich oberhalb von TS1 (CER) und TS3 (D). Verdeutlicht wird dies durch die Box-Whisker-Plots in Abbildung 5.25.

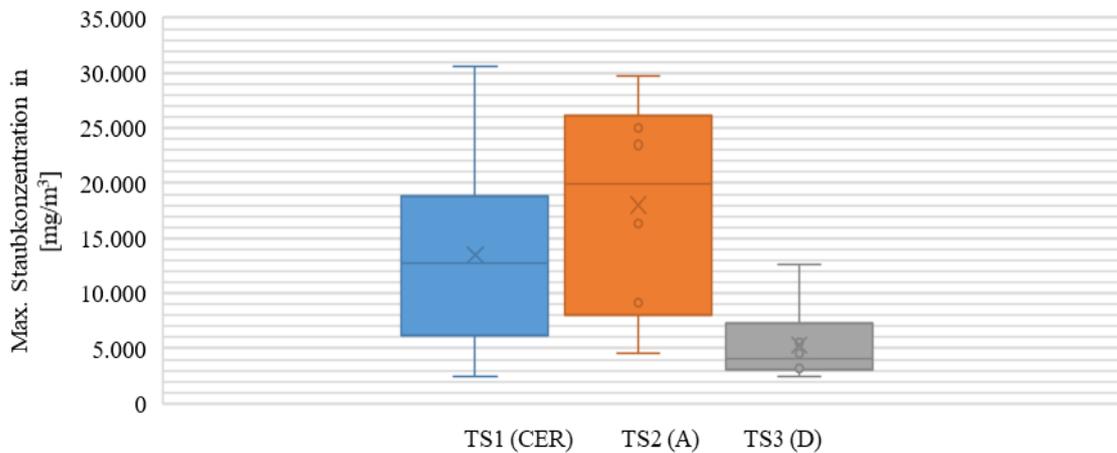


Abbildung 5.25: Vergleich der maximalen Staubkonzentration TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) an Werkstück 1

Anhand der Darstellung in Form von Box-Whisker-Plots kann ein Zusammenhang zwischen der Staubkonzentration und dem Massenverlust der Trennscheiben (vgl. Abbildung 5.15) hergestellt werden. Die beiden Grafiken zeigen, dass sowohl die Staubkonzentrationen wie auch der Massenverlust von TS2 (A) größer sind als bei TS1 (CER) und TS3 (D) sind. Aus dem geringen Massenverlust der diamantbesetzten Trennscheibe resultiert ein geringerer Scheibenverschleiß und hieraus eine geringere Staubbelastung im Vergleich zu Keramik und Korund. Es gilt:

$$\begin{aligned} \text{Staubkonzentration} + \text{Massenverlust TS3 (D)} < \\ \text{Staubkonzentration} + \text{Massenverlust TS1 (CER)} < \\ \text{Staubkonzentration} + \text{Massenverlust TS2 (A)} \end{aligned}$$

Am Beispiel des Schleifmittels Korunds wird die Abhängigkeit zwischen Staubkonzentration und Massenverlust gezeigt. Hierzu sind in Abbildung 5.26 die genannten Zielgrößen über die Vorschubgeschwindigkeiten V_{f1} bis V_{f6} von TS2 (A) an Werkstück 1 dargestellt. Bei V_{f6} ist der Massenverlust der Trennscheibe und die Staubkonzentration im Durchschnitt und im Maximum am höchsten. Je kleiner der Massenverlust, desto geringer ist auch die durchschnittliche Staubkonzentration. Eine Abweichung hiervon liefert lediglich die maximale Staubkonzentration bei V_{f1} und die durchschnittliche Staubkonzentration bei V_{f5} . Ein Grund könnte in der fehlerhaften Kalibrierung der Sonde liegen.

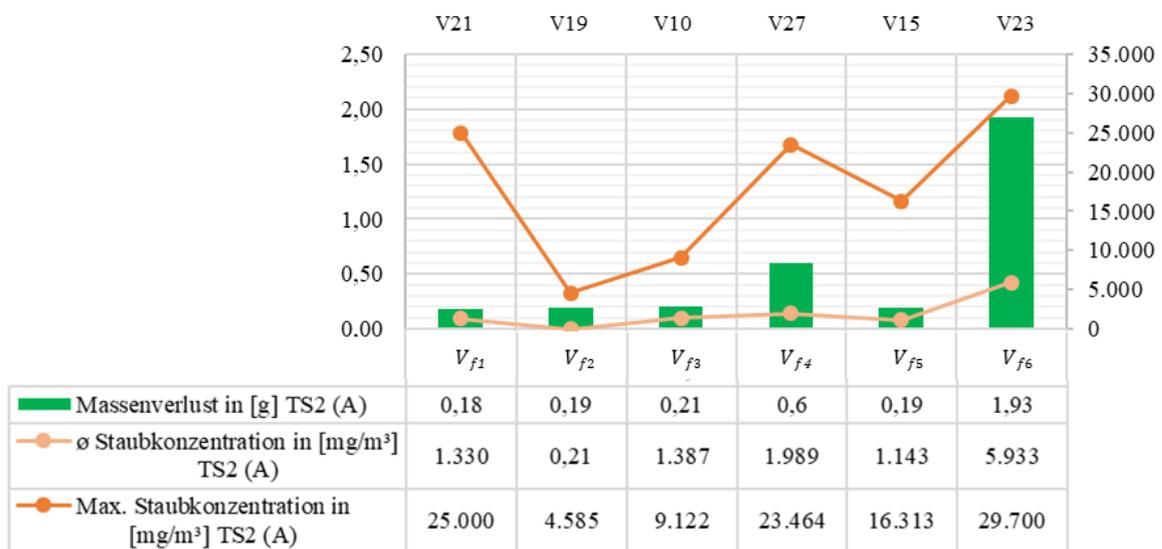


Abbildung 5.26: Vergleich Massenverlust und Staubkonzentration von TS2 (A) an Werkstück 1

Bei allen drei Trennscheiben wird der ASGW nach der TRGS für Chromverbindungen (vgl. Absatz 4.5.4) in Versuchsreihe 1 überschritten und nicht eingehalten. Da der Trennvorgang von der Rohrinenseite erfolgt, wird die Staubbelastung durch das zu trennende Rohr abgeschirmt und der Staub kann sich im Vergleich zur Rohraußentrennung weniger stark in der Luft verbreiten. Hinsichtlich der Konstruktion einer Rohrintrennvorrichtung sollte dennoch zum Schutz aller Personen eine Absaugung vorgesehen werden. Ferner wirkt sich eine fernhantierte Bedienung positiv auf die Gesundheit des Personals aus, da der Abstand zur Staubquelle reduziert werden kann. Zur Förderung der Gesundheit der am Rückbau beteiligten Personen ist bei der Rohrintrennung dennoch eine entsprechende Schutzausrüstung, wie z.B. eine Atemschutzmaske, zu tragen.

Wissenschaftliche Erkenntnisse Staubkonzentration

- Die Staubkonzentrationen für die untersuchten Trennscheiben sind abhängig von dem Massenverlust der Scheiben während der Rohrintrennung. Die Staubkonzentrationen sowie der Massenverlust von TS3 (D) sind kleiner als TS1(CER) und TS2 (A), (vgl. Abbildung 5.25 und Abbildung 5.15).

- Die Grenzwerte der Staubkonzentrationen für die Bearbeitung von Chromverbindungen gemäß TRGS 561 werden für TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) überschritten.
- Bei Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik, Korund und Diamant sind demnach Schutzmaßnahmen für das Bedienerpersonal der Rohrintrennvorrichtung zu ergreifen. Da der Trennvorgang von der Rohrintrennseite erfolgt, wird eine Abschirmung der Staubkonzentration durch das zu trennende Rohr erreicht.
- Erfolgt der Trennvorgang mittels Trennscheiben, sollte eine Rohrintrennvorrichtung mit einer Absaugung ausgestattet und die Möglichkeit zur Fernhandlung gegeben sein.

5.1.6 Zusammenfassender Vergleich Trennscheiben und Betriebsparameterwahl

Die Auswertung der Zielgrößen für Trennscheiben hat gezeigt, dass die Systembeschreibung mittels des in Abbildung 4.1 dargestellten Parameterdiagrammes einschließlich der zugehörigen Messtechnik und Methodik zur Analyse der definierten Zielgrößen geeignet ist. Ausgehend von den nachgewiesenen Abhängigkeiten der definierten Zielgrößen können signifikante Messfehler ausgeschlossen werden, die generierten Daten der Zielgrößen untereinander sind konform. In Anhang A-1.1 sind weitere Angaben zur Genauigkeit bzw. Wiederholbarkeit der Versuchsreihen am Beispiel der Schnittkraftentwicklung aufgeführt.

Auf Basis der vorangegangenen Ergebnisse und Datenauswertung, werden abschließend die Ergebnisse für die Zielgrößen Schnittkraft, Volumenabtrag, Massenverlust und maximale Temperatur für die untersuchten Schleifmittel Keramik, Korund und Diamant in Abbildung 5.27 gegenübergestellt. Die Scheibenbreite von 2 mm von TS3 (D) gegenüber der Scheibenbreite von 1 mm von TS1 (CER) und TS2 (A) ist zu beachten. Die Staubkonzentration wird nicht aufgeführt, da bei allen Schleifmitteln der ASGW überschritten wird.

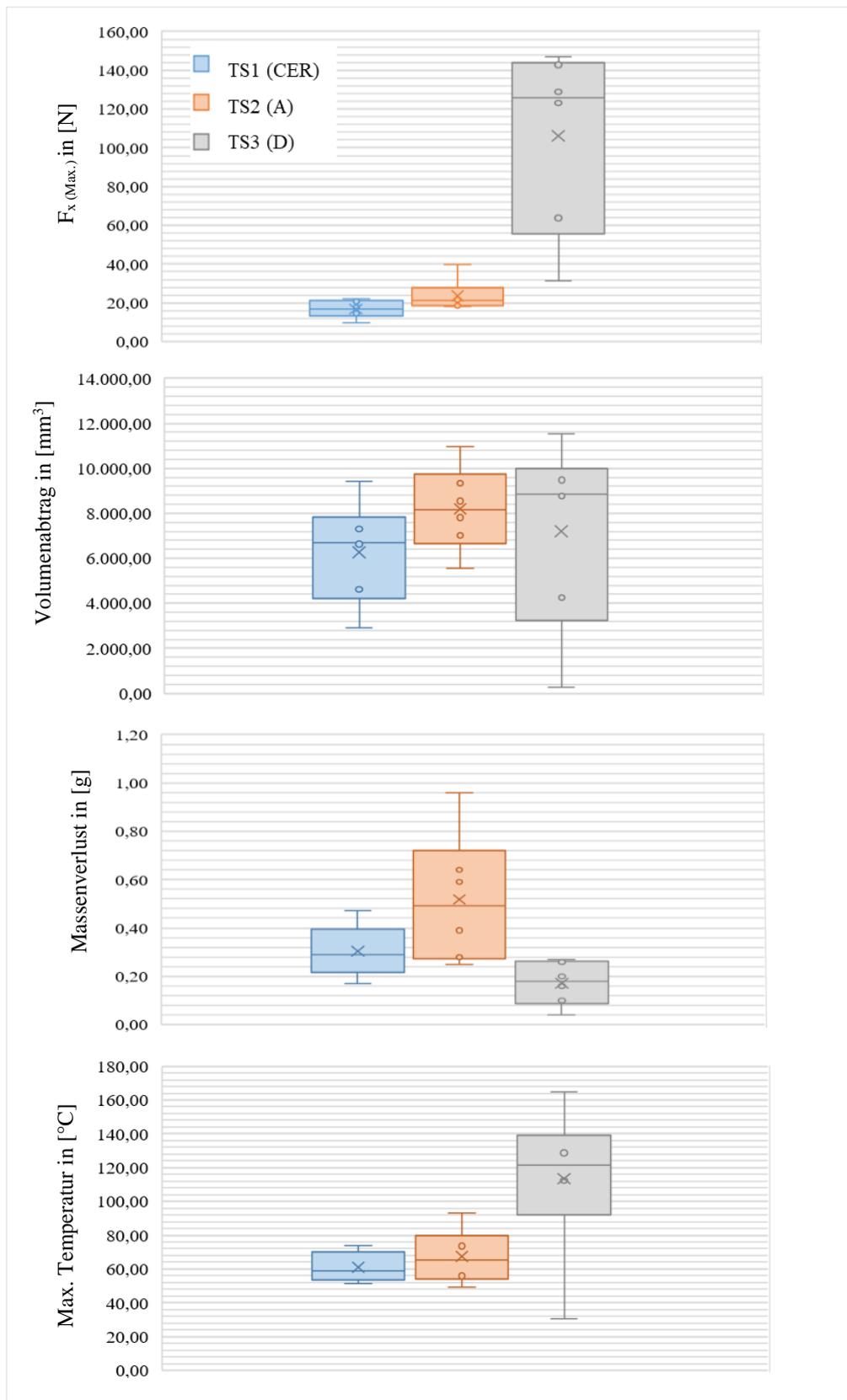


Abbildung 5.27: Gegenüberstellung Ergebnisse Zielgrößen in Form von Box-Whisker-Plots für Trennscheiben am Beispiel von Versuchsreihe 2

Ausschlaggebend für die Wahl des Schleifmittels ist der Volumenabtrag, mit dem Ziel, das zu trennende Rohr vollständig bzw. bis auf die gewünschte Restwanddicke trennen zu können bei einer gleichzeitig hohen Standzeit der Trennscheibe. Letztere wurde anhand des Massenverlustes der Trennscheiben und durch die Wärmeentwicklung an der Werkzeugschneide unmittelbar nach Versuchsende analysiert.

Die Versuchsreihen ergeben für das Schleifmittel Korund einen etwas höheren Volumenabtrag als für das Schleifmittel Keramik. Der Volumenabtrag der diamantbesetzten Trennscheibe ist größeren Schwankungen unterworfen, dies wird sichtbar durch die Größe der Box in Abbildung 5.27. Zudem bezieht sich der Volumenabtrag von TS3 (D) auf eine Scheibenbreite von 2 mm. Es wird die Annahme getroffen, dass der Volumenabtrag bei einer Halbierung der Scheibenbreite um die Hälfte abnimmt. Demnach ist der Volumenabtrag von TS3 (D) kleiner als von TS1 (CER) und TS2 (A).

Unter dem Gesichtspunkt der Verschleißminimierung ist für die Trennung freiliegender Rohrleitungen das Schleifmittel Keramik gegenüber Korund zu bevorzugen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Standzeit von Korund geringer ist und der Volumenabtrag über die Zeit abnimmt (vgl. Abbildung 5.9). Durch die Auswertung des Massenverlustes und der Temperaturentwicklung in Absatz 5.1.4, konnten hierfür folgende Gründe identifiziert und anhand der Auswertung der generierten Daten belegt werden:

- Härte des Schleifmittels
- Selbstschärfungsprozess der Schleifkörner
- Wärmeentwicklung an der Werkzeugschneide

Für die Rohrintrennung in kerntechnischen Anlagen, in welchen vorzugweise Chrom-Nickel-Edelstähle verwendet werden (vgl. Tabelle 2.2), sind daher Trennscheiben aus Keramik zur Trennung freiliegender Rohrleitungen zu wählen. Diese erzielen einen guten Volumenabtrag bei einem geringeren Massenverlust und einer geringeren Temperaturentwicklung als Trennscheiben mit dem Schleifmittel Korund. Diamantbesetzte Trennscheiben eignen sich vorzugweise für die Trennung einbetonierter Rohrleitungen. Im Vergleich zu Keramik erzielt Diamant einen gleichmäßigeren Schnitt über die gesamte Schnitttiefe hinweg. Hierauf wurde am Ende von Absatz 5.1.3 in Versuchsreihe 5 eingegangen.

Grundsätzlich sind aus Gründen der Wirtschaftlichkeit die Kosten der einzelnen Verfahren bzw. der eingesetzten Werkzeuge zu berücksichtigen. Wie eingangs in Absatz 1.1 erwähnt, betragen die Kosten für den Rückbau eines Kernkraftwerkes ca. 1 Milliarde Euro [4]. Aus Sicht der Energieversorgungsunternehmen, die den Rückbau ihrer Anlagen finanzieren müssen, sind demnach die Kosten der eingesetzten Demontagetechniken relevant. Die Anschaffungskosten der drei Trennwerkzeuge liegen zwischen 3,00 € und 40,00 € (vgl. Tabelle 4.4). Bei den Kosten der ausgewählten Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik (5,51 €) und Korund (3,78 €) bestehen keine wesentlichen Unterschiede. Die diamantbesetzte Trennscheibe (40,46 €) ist etwas teurer als TS1 (CER) und TS2 (A). Die verhältnismäßig geringen Anschaffungskosten sind damit nicht ausschlaggebend für die Wahl eines geeigneten Trennwerkzeuges zur Rohrintrennung.

Ebenfalls nicht entscheidend ist die Staubkonzentration während des Trennvorgangs, da bei allen drei Schleifmitteln der ASGW überschritten wird und eine Rohrintrennvorrichtung grundsätzlich eine Absaugung aufweisen muss.

Betriebsparameterwahl Schleifmittel Keramik

Unter dem Gesichtspunkt der Maximierung des Volumenabtrages bei einer gleichzeitig hohen Standzeit der Trennscheibe, werden basierend auf den experimentellen Versuchsreihen zur Rohrintrennung für Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik folgende Empfehlungen für die Betriebsparameter, bei einer Drehzahl von 6.000 min^{-1} , ausgesprochen:

- Vorschubgeschwindigkeit: $V_{f4} - V_{f5}$

Die Wahl der Vorschubgeschwindigkeit lässt sich damit begründen, dass der Volumenabtrag mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit steigt (vgl. Abbildung 5.5). Grundsätzlich kann mit einer höheren Vorschubgeschwindigkeit demnach die Rohrintrennung schneller vollzogen werden. Gleichzeitig steigt mit erhöhter Vorschubgeschwindigkeit jedoch auch der Massenverlust der Trennscheibe (vgl. Abbildung 5.17). Da Keramikkörner selbstschärfend sind, sind die Auswirkungen des Massenverlustes nicht so stark ausgeprägt wie beispielsweise bei Trennscheiben mit Schleifmittel Korund. Unter dem Gesichtspunkt der Standzeit der Trennscheibe und der Wirtschaftlichkeit, sollte demnach nicht die höchste Vorschubgeschwindigkeit gewählt werden. Ferner wurde aufgezeigt, dass mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit die Schnittkräfte steigen (vgl. Abbildung 5.5). Dies hat Auswirkungen auf die Konstruktion der Rohrintrennvorrichtung und die Auslegung der Komponenten.

Prinzipiell können, je nach Anwendungsfall, auch niedrigere Vorschubgeschwindigkeiten für die Rohrintrennung gewählt werden. Auch bei einem Vorschub kleiner V_{f4} ist die Rohrintrennung erfolgreich.

- Umfangsgeschwindigkeit V_c : $39,27 \text{ m/s}$

Die Umfangsgeschwindigkeit V_c ergibt sich aus (1.0):

$$V_c = n * d * \pi \quad (1.0)$$

mit den Eingangsgrößen:

- Drehzahl n : 6.000 min^{-1}
- Scheibendurchmesser d : 125 mm

zu:

$$V_c = 6.000 \text{ min}^{-1} * 125 \text{ mm} * \pi$$

$$V_c = 39,27 \text{ m/s}$$

Die Betriebsparameter gelten für eine Trennscheibe mit Schleifmittel Keramik mit den nachfolgenden Eingangsgrößen:

- Scheibendurchmesser: 125 mm
- Scheibenbreite: 1 mm
- Bauform: BF 41 (gerade Trennscheibe)
- Bindung: faserverstärkte Kunstharzbindung

Die Betriebsparameter konnten an Rohrleitungen mit und ohne Längsschweißnaht an Chrom-Nickel-Edelstählen und unlegierten, warmfesten Stählen verifiziert werden. Die Untersuchungen waren auf einem Rohraußendurchmesser von 219,1 mm ausgelegt. Die Übertragbarkeit auf Rohrleitungen mit größeren Rohrdurchmessern konnte durch Versuchsreihe 3, siehe Anhang A-2, bestätigt werden. Mit den gewählten Betriebsparametern kann auch die Längsschweißnaht gleichmäßig durchtrennt werden. Bei Trennscheiben konnten keine Probleme bei der Trennung der Schweißnaht festgestellt werden.

Grundsätzlich können mit den Betriebsparametern auch in Beton verlegte Rohrleitungen getrennt werden (vgl. Absatz 5.1.3, Versuchsreihe 5), wodurch eine universelle Rohrintrennung verschiedenster Rohrleitungen gegeben ist. Wie aufgezeigt, erzielen diamantbesetzte Trennscheiben bei einbetonierten Rohrleitungen jedoch ein gleichmäßigeres Schnittbild und sind daher Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik vorzuziehen. Daher werden nachfolgend auch Betriebsparameter für das Schleifmittel Diamant ausgesprochen.

Betriebsparameterwahl Schleifmittel Diamant

Unter dem Gesichtspunkt der Maximierung des Volumenabtrages bei einer gleichzeitig hohen Standzeit der Trennscheibe werden basierend auf den experimentellen Versuchsreihen zur Rohrintrennung für Trennscheiben mit Schleifmittel Diamant folgende Empfehlungen für die Betriebsparameter, bei einer Drehzahl von 6.000 min^{-1} , ausgesprochen:

- Vorschubgeschwindigkeit: V_{f5}

Im Gegensatz zum Schleifmittel Keramik geht bei Diamant mit Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit keine signifikante Erhöhung des Massenverlustes und damit eine Verringerung der Standzeit einher. Zurückzuführen ist dies federführend auf die Härte des Schleifmittels Diamant.

- Umfangsgeschwindigkeit V_c : 39,27 m/s

Die Umfangsgeschwindigkeit V_c ergibt sich aus (1.0). Die Berechnung erfolgt analog zu Trennscheiben mit Schleifmittel Keramik (Drehzahl n : 6.000 min^{-1} , Scheibendurchmesser d : 125 mm).

Die Betriebsparameter gelten für eine Trennscheibe mit Schleifmittel Diamant mit den nachfolgenden Eingangsgrößen:

- Scheibendurchmesser: 125 mm
- Scheibenbreite: 2 mm
- Bauform: BF 41 (gerade Trennscheibe)

Tabelle 5.8 fasst die Empfehlungen für Trennscheiben aus Keramik und Diamant abschließend zusammen.

Tabelle 5.8: Betriebsparameterwahl und Anwendungsempfehlungen Trennscheiben

Trennwerkzeug	TS1 (CER) Trennscheibe Keramik	TS 3 (D) Trennscheibe Diamant
Empfohlene Betriebsparameter		
Vorschubgeschwindigkeit V_f	$V_{f4} - V_{f5}$	V_{f5}
Umfangsgeschwindigkeit V_c	39,27 m/s	39,27 m/s
Drehzahl	6.000 min ⁻¹	6.000 min ⁻¹
Empfohlener Anwendungsbereich		
Werkstoff	Chrom-Nickel-Edelstahl, unlegierter/warmfester Stahl	
Erzeugnisform	nahtlose Rohrleitungen, geschweißte Rohrleitungen	
Einbaulage	freiliegende Rohrleitungen, in Beton verlegte Rohrleitungen	in Beton verlegte Rohrleitungen

Konstruktionsempfehlungen

Grundlage für die Konstruktion einer Rohrintrennvorrichtung sind die Versuchsreihen an einem nahtlosen Rohr. Aufgrund der größeren Ovalität geschweißter Rohrleitungen, ist der Volumenabtrag und damit verbunden die Schnittkraft am nahtlosen Rohr bei Trennscheiben höher als an geschweißten Rohrleitungen (vgl. Absatz 5.1.3, Versuchsreihe 1 und 2).

Für eine möglichst universelle Einsetzbarkeit der Rohrintrennvorrichtung (freiliegende und in Beton verlegte Rohrleitungen) wird die Anwendung der Schleifmittel Keramik und Diamant empfohlen. Entscheidend für die Auslegung der Rohrintrennvorrichtung sind damit die Schnittkräfte der diamantbesetzten Trennscheibe. Wie in Abbildung 5.2 aufgezeigt, werden bei TS3 (D) an Werkstück 2 (nahtlos) maximale Kräfte von bis zu 150 N gemessen. Die Schnittkräfte an TS1 (CER) und TS2 (A) sind über die untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten von V_{f1} bis $V_{f6} \leq 40 \text{ N}^{29}$. Bei einer Auslegung der Rohrintrennvorrichtung für diamantbesetzte Trennscheiben können auch Trennscheiben mit den Schleifmitteln Keramik und Korund eingesetzt werden.

Zur Sicherheit des Bedienpersonals muss die Rohrintrennvorrichtung eine Absaugung besitzen, da der AGSW gemäß der TRGS 561 bei allen drei Schleifmitteln überschritten wird. Des Weiteren kann die Sicherheit durch ein fernhantiertes System erhöht werden, da die am Rückbau Beteiligten einen größeren Abstand zu der zu trennenden Rohrleitung halten können.

Im anschließenden Absatz wird nun die Datenauswertung der Versuchsreihen mit Scheibenfräser und Kreissägeblättern behandelt.

²⁹ Es muss berücksichtigt werden, dass die Schnittkräfte mit steigendem Volumenabtrag steigen, d.h. die Wanddicke der zu trennenden Rohrleitungen muss beachtet werden.

5.2 Versuchsreihen mit Scheibenfräser und Kreissägeblättern

Die im nachfolgenden beschriebenen Versuchsreihen mit Scheibenfräser (SF) und Kreissägeblättern (KSB) an verschiedenen Werkstücken zur Rohrintrennung sind motiviert durch die:

- Untersuchung der **Schnittkraftentwicklung** in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl,
- Ermittlung des **Volumenabtrages** in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl,
- Untersuchung der **Standzeit** durch die Analyse der **Wärmeentwicklung** in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl.

Insgesamt werden mit SF1 (HSS), KSB1 (HSS), KSB2 (HSS, TiAlN) und KSB3 (VHM, TiAlN) vier verschiedene Trennwerkzeuge aus den Schneidstoffen HSS und VHM mit und ohne Beschichtung (hier: TiAlN) untersucht. Die Ausführungen der untersuchten Scheibenfräser und Kreissägeblätter wurden in Absatz 4.2.1.1 und die Parameter der verwendeten Werkstücke in Absatz 4.3 beschrieben. Bei der grafischen Auswertung werden die in den Versuchsreihen generierten Daten von SF1 (HSS) in Rot und die von KSB1(HSS) in Grün dargestellt. Für KSB2 (HSS, TiAlN) wird der Farbton Orange und für KSB3 (VHM, TiAlN) Lila gewählt. In der Abbildungs- bzw. Tabellenbeschriftung wird explizit erwähnt, welchem Werkstück die Auswertung zuzuordnen ist. Anhang B-4 sind die Versuchspläne der durchgeführten Versuchsreihen zu entnehmen.

In der anschließenden Datenauswertung für Scheibenfräser und Kreissägeblätter wird, sofern möglich, ein Bezug zu den bereits dargestellten Ergebnissen und Auswertungen von Trennscheiben hergestellt. Können Ergebnisse bestätigt werden, wird auf die Datenauswertung von Trennscheiben verwiesen, um eine Wiederholung der Inhalte zu vermeiden.

Im Gegensatz zu Trennscheiben, wird die Standzeit für Scheibenfräser und Kreissägeblätter lediglich durch die Temperatur an der Werkzeugschneide unmittelbar nach Versuchsende analysiert. Das Wiegen der Trennwerkzeuge aus den Schneidstoffen HSS bzw. VHM führt zu keinem aussagekräftigen Ergebnis, da der Massenverlust zu gering ist. Erklären lässt sich dies durch den Aufbau der Scheiben, die aus dünnen, kreisrunden Stahlscheiben mit einer Zahnung an der Außenseite bestehen. Bei Trennscheiben konnte der Massenverlust der Scheiben infolge des abgetragenen Schleifmittels während des Trennprozesses bestimmt werden.

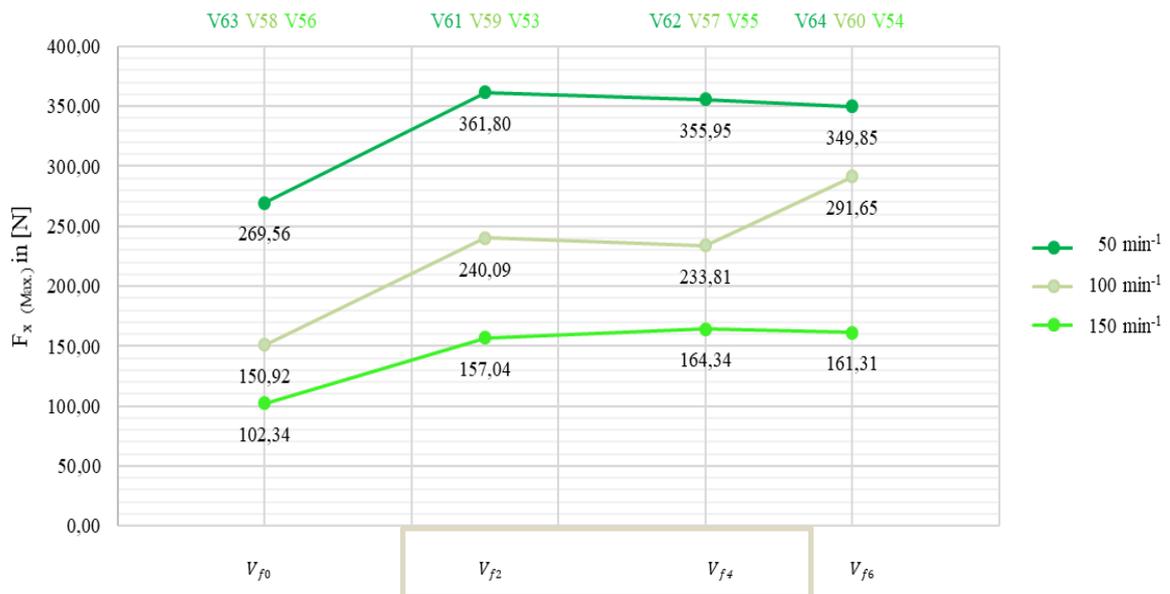
5.2.1 Vorversuche Kreissägeblatt (KSB1, HSS)

Durch die Vorversuche sollen die Systemgrenzen für Scheibenfräser und Kreissägeblätter untersucht und die Stufenwerte der Faktoren für die Hauptversuche eingegrenzt werden. Die Vorversuche werden exemplarisch mit KSB1 (HSS) an Werkstück 1 (1.4541, d_A : 219,1 mm, geschweißt) durchgeführt. Tabelle 5.9 zeigt, dass drei unterschiedliche Drehzahlen und vier Vorschubgeschwindigkeiten untersucht werden. Hieraus ergeben sich insgesamt zwölf Vorversuche.

Tabelle 5.9: Stufenwerte Vorversuche mit KSB1 (HSS)

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
Vorversuche			
Trennwerkzeug	[-]	kategoriell	KSB1 (HSS)
Werkstück	[-]	kategoriell	1
Drehzahl	[min ⁻¹]	stetig	50, 100, 150
Vorschubgeschwindigkeit	[-]	stetig	$V_{f0}, V_{f2}, V_{f4}, V_{f6}$
Summe Vorversuche			12

In Abbildung 5.28 ist die Schnittkraftentwicklung für KSB1 (HSS) in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl an Werkstück 1 dargestellt. Als Ergebnis der Vorversuche kann festgehalten werden, dass mit einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit eine Zunahme der Schnittkraft $F_{x(\text{Max.})}$ einhergeht. Zusätzlich ist mit einer Zunahme der Drehzahl eine Reduzierung von $F_{x(\text{Max.})}$ verbunden. Einzelne Schwankungen in den Versuchsergebnissen lassen sich damit erklären, dass die Vorversuche an Werkstück 1 durchgeführt wurden. In Anhang B-2 werden durch einen Vergleich der Daten der ersten und zweiten Versuchsreihe am Beispiel von KSB1 (HSS) die Unterschiede zwischen einer Rohrleitung mit und ohne Längsschweißnaht bestätigt. Im Rahmen der Datenauswertung mit Trennscheiben konnte der Einfluss der Schweißnaht auf die Rohrintrennung ebenfalls nachgewiesen werden (vgl. Absatz 5.1.3).

**Abbildung 5.28:** Schnittkraftentwicklung für KSB1 (HSS) in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl an Werkstück 1

Wahl Vorschubgeschwindigkeit
für Hauptversuche: V_{f2}, V_{f3}, V_{f4}

Bei den Vorversuchen mit KSB1 (HSS) konnte beobachtet werden, dass zu geringe und zu hohe Vorschubgeschwindigkeiten nicht zur Rohrintrennung geeignet sind. Die Versuchsreihen mussten teilweise unterbrochen und neu gestartet werden. Bei V_{f0} war u.a. die Geräusentwicklung sehr stark, und die Zähne des Sägeblatts hatten durch die geringe Vorschubgeschwindigkeit nicht ausreichend Eingriff in die zu trennende Rohrleitung. Bei V_{f6} ist das Trennwerkzeug dahingegen teilweise leicht gesprungen. Zudem kam es zu hohen Vibrationen während der Versuchsdurchführung. Aus diesen Gründen werden in den Hauptversuchen die Vorschubgeschwindigkeiten für Scheibenfräser und Kreissägeblätter auf V_{f2} , V_{f3} und V_{f4} eingegrenzt.

Die Wahl der Drehzahl beruht u.a. auf Herstellerangaben und Rücksprachen mit der Firma Hoffmann Group. Deren Auskunft zufolge sind Herstellerangaben prinzipiell lediglich Orientierungswerte und können je nach Anwendungsfall unter- bzw. überschritten werden.

Im Gegensatz zur Rohrintrennung mittels Trennscheiben konnte mit KSB1 (HSS) die Schweißnaht nicht gleichmäßig durchtrennt werden. Dies trifft für alle Faktoren der Vorversuche mit KSB1 (HSS) zu. Hierzu sind weitere Analysen in den Hauptversuchen notwendig.

5.2.2 Hauptversuche Scheibenfräser und Kreissägeblätter

Es werden vier Versuchsreihen mit einem Scheibenfräser und drei Kreissägeblättern durchgeführt. Die untersuchten Stufenwerte und Faktoren der Versuchsreihen zeigt Tabelle 5.10.

Zu Beginn wird in Versuchsreihe 2 untersucht, ob wesentliche Unterschiede bei der Rohrintrennung zwischen SF1 (HSS) und KSB1 (HSS) bestehen. Beide Trennwerkzeuge bestehen aus dem Schneidstoff HSS, haben keine Werkzeugbeschichtung und weisen eine Scheibenbreite von 3 mm auf. Mit Werkstück 2 (Werkstoff: 1.4541, d_A : 219,1 mm) finden die Versuche an einem nahtlosen Werkstück statt. Die herstellungsbedingten Einflüsse der Schweißnaht auf die Rundheit der Rohrleitungen und damit auf die Versuchsergebnisse sollen vermieden werden.

In Versuchsreihe 1 werden anschließend Versuche zur Eingrenzung und Wahl der Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl an Werkstück 1 (Werkstoff: 1.4541, d_A : 219,1 mm) mit KSB1 (HSS), KSB2 (HSS, TiAlN) und KSB3 (VHM, TiAlN) durchgeführt. Werkstück 1 besitzt eine Längsschweißnaht. Da in den Vorversuchen Probleme bei der Trennung der Schweißnaht auftraten, wird Werkstück 1 gewählt, um bestenfalls Betriebsparameter identifizieren zu können, die eine vollständige Rohrintrennung der Schweißnaht ermöglichen. Die Schnittkräfte der Vorversuche mit KSB1 (HSS) an Werkstück 1 in Abbildung 5.28 zeigen im Gegensatz zu Trennscheiben kleinere Schwankungen infolge der Schweißnaht wie bei Trennscheiben (vgl. Abbildung 5.3).

Durch die dritte und vierte Versuchsreihe an Werkstück 3 (Werkstoff: 1.4541, d_A : 273,0 mm) bzw. 4 (Werkstoff: 1.0345, d_A : 219,1 mm) werden die Versuche zur Rohrintrennung auf einen größeren Werkstückdurchmesser und auf den Werkstoff 1.0345 ausgeweitet. Durch die Versuche soll die universelle Einsetzbarkeit einer zu entwickelnden Rohrintrennvorrichtung für verschiedene Werkstücke nachgewiesen werden. Werkstück 3 ist geschweißt und Werkstück 4 nahtlos.

Für die spanenden Fertigungsverfahren Fräsen und Schleifen werden keine Versuchsreihen an einem einbetonierten Werkstück durchgeführt. Sowohl Scheibenfräser als auch Kreissägeblätter stumpfen bei Kontakt mit Beton ab. Durch die Ovalität der Werkstücke ist es nicht möglich, die Versuche abzubrechen, bevor Kontakt mit der umgebenden Betonstruktur entsteht.

Tabelle 5.10: Stufenwerte Hauptversuche Scheibenfräser (SF1) und Kreissägeblätter (KSB1-3)

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
Versuchsreihe 1			
Trennwerkzeug	[-]	kategoriell	KSB1 (HSS), KSB2 (HSS, TiAlN), KSB3 (VHM, TiAlN)
Werkstück	[-]	kategoriell	1
Drehzahl	[min ⁻¹]	stetig	50, 100, 150, 200
Vorschubgeschwindigkeit	[-]	stetig	V_{f2}, V_{f3}, V_{f4}
Versuchsreihe 2			
Trennwerkzeug	[-]	kategoriell	SF1 (HSS), KSB1 (HSS)
Werkstück	[-]	kategoriell	2
Drehzahl	[min ⁻¹]	stetig	50, 100, 150, 200
Vorschubgeschwindigkeit	[-]	stetig	V_{f4}
Versuchsreihe 3			
Trennwerkzeug	[-]	kategoriell	KSB1 (HSS)
Werkstück	[-]	kategoriell	3
Drehzahl	[min ⁻¹]	stetig	50, 100, 150
Vorschubgeschwindigkeit	[-]	stetig	V_{f4}
Versuchsreihe 4			
Trennwerkzeug	[-]	kategoriell	KSB1 (HSS)
Werkstück	[-]	kategoriell	4
Drehzahl	[min ⁻¹]	stetig	50, 100, 150
Vorschubgeschwindigkeit	[-]	stetig	V_{f4}
Summe Hauptversuche			29

5.2.3 Ergebnisse und Auswertung Schnittkraft, Volumenabtrag und Wärmeentwicklung

Die Datenauswertung für Scheibenfräser und Kreissägeblätter unterscheidet sich insofern von Trennscheiben, da die Zielgrößen hinsichtlich Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit untersucht werden müssen. Aus diesem Grund weicht die Struktur der Datenauswertung für Scheibenfräser und Kreissägeblätter von jener für Trennscheiben ab. Nachfolgend wird zuerst der Einfluss der Drehzahl auf die Zielgrößen untersucht. Daran anschließend folgt die Auswertung für die Vorschubgeschwindigkeit.

Versuchsreihe 2: Vergleich Zielgrößen für KSB1 (HSS) und SF1 (HSS)

Der Vergleich der Trennwerkzeuge SF1 (HSS) und KSB1 (HSS) wird an Werkstück 2 (nahtlos) mit Vorschubgeschwindigkeit V_{f4} durchgeführt. Einflüsse der Schweißnaht auf die Datenerhebung sollen vermieden werden. Aus diesem Grund wird nicht Werkstück 1 (geschweißt) gewählt. Die Temperaturen an der Werkzeugschneide bzw. an den Zähnen für KSB1 (HSS) und

SF1 (HSS), zu sehen in Abbildung 5.29, weisen keine signifikanten Unterschiede auf. Die Bestimmtheitsmaße für SF1 (HSS) mit $R^2 = 0,9999$ und für KSB1 (HSS) mit $R^2 = 0,9498$ sind annähernd identisch und stellen eine sehr gute Annäherung an die Trendlinie dar. Mit zunehmender Drehzahl steigen bei beiden Trennwerkzeugen die maximal gemessenen Temperaturen an der Werkzeugschneide. Eine Erklärung hierfür liefert ein Vergleich der Zielgrößen maximale Temperatur, Volumenabtrag und Schnittkraft in Abbildung 5.29.

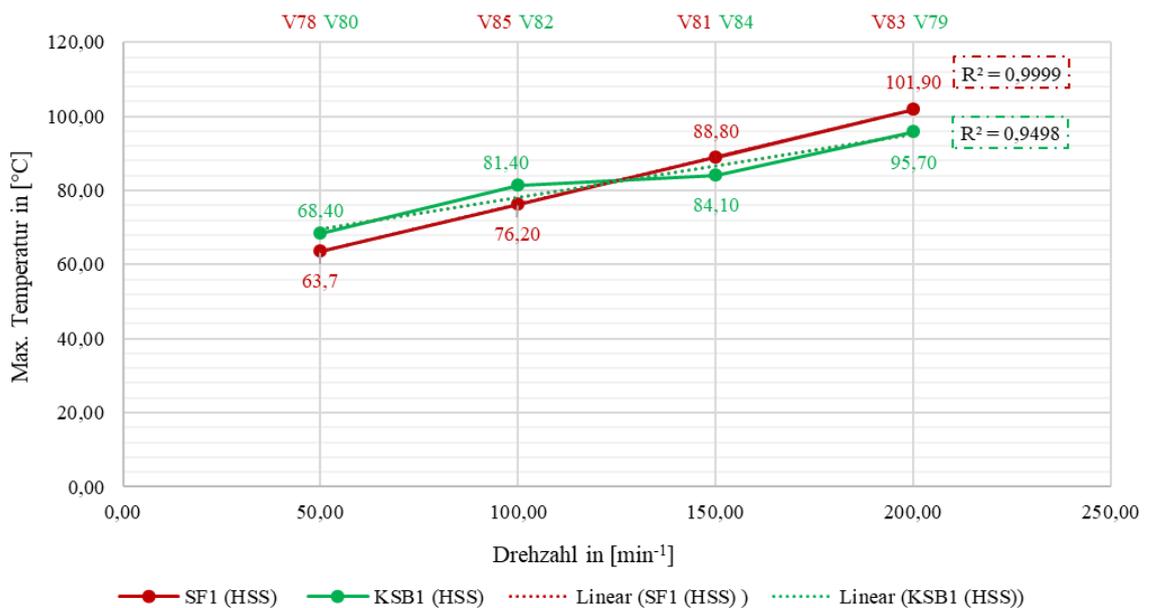


Abbildung 5.29: Vergleich maximale Temperatur von SF1 (HSS) und KSB1 (HSS) an Werkstück 2 bei V_{f4}

Sowohl bei SF1 (HSS) als auch bei KSB1 (HSS) tritt die maximale Temperatur an jenen Zähnen auf, die vor Versuchsende im Eingriff waren. Zu sehen ist dies in den Wärmebildern mit Hotspot-Markierung (HS1) in Abbildung 5.30. Bei beiden Trennwerkzeugen ist eine durchgehend erhöhte Temperatur an allen Zähnen entlang der Scheibe zu sehen.

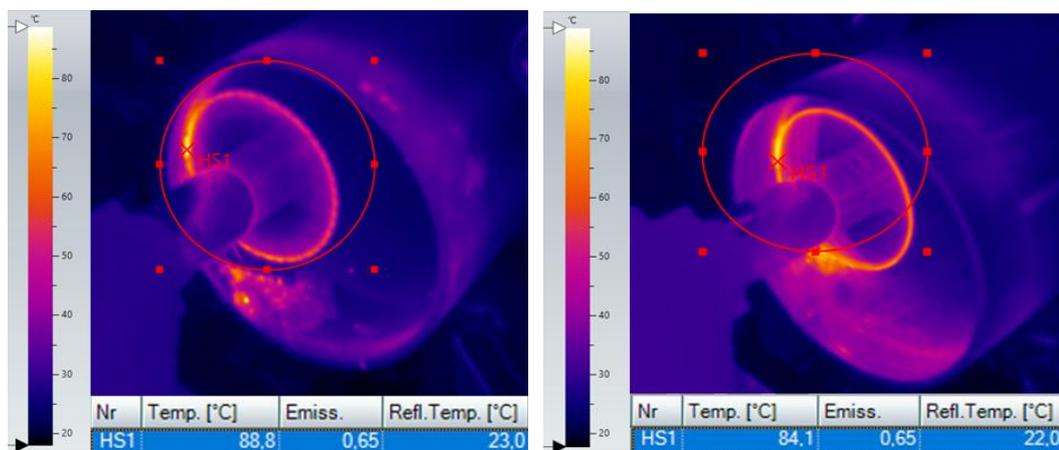


Abbildung 5.30: Wärmebild mit Hotspot bei V_{f4} und Drehzahl 150 min⁻¹ - links: SF1 (HSS) - Versuch 81; rechts: KSB1 (HSS) - Versuch 84

Die Versuche wurden mit den identischen Eingangsparametern durchgeführt und beide Trennwerkzeuge aus dem Schneidstoff HSS haben eine Scheibenbreite von 3 mm. Die geringe Standardabweichung für die Trennwerkzeuge je Drehzahl unterstreicht die geringen Unterschiede in der Wärmeentwicklung an der Werkzeugschneide. Es folgen mathematische Betrachtungen zur Wärmeentwicklung für KSB1 (HSS) und SF1 (HSS).

Mathematische Auswertung:

Zur mathematischen Auswertung der maximal gemessenen Temperaturen an der Werkzeugschneide zwischen KSB1 (HSS) und SF1 (HSS) wird die Standardabweichung σ gebildet. Nach *DATAtab* [144] gibt die Standardabweichung „die Streubreite einer Variablen rund um deren Mittelwert an.“ Die Standardabweichung nimmt die Einheit der betrachteten Daten an und berechnet sich nach [144] mit (2.0):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.0)$$

Tabelle 5.11 sind die Standardabweichungen für SF1 (HSS) und KSB1 (HSS) für vier Drehzahlen an Werkstück 2 bei V_{f4} zu entnehmen.

Tabelle 5.11: Standardabweichung Wärmeentwicklung SF1 (HSS) und KSB1 (HSS)

Eingangsgrößen					Ausgangsgrößen		
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschub	Drehzahl [min ⁻¹]	Max. Temp. in [°C]	\bar{x} [°C]	σ [°C]
78	2	SF1 (HSS)	V_{f4}	50,00	63,7	66,05	2,35
80	2	KSB1 (HSS)	V_{f4}	50,00	68,4		
85	2	SF1 (HSS)	V_{f4}	100,00	76,20	78,80	2,60
82	2	KSB1 (HSS)	V_{f4}	100,00	81,40		
81	2	SF1 (HSS)	V_{f4}	150,00	88,80	86,45	2,35
84	2	KSB1 (HSS)	V_{f4}	150,00	84,10		
83	2	SF1 (HSS)	V_{f4}	200,00	101,90	98,80	3,10
79	2	KSB1 (HSS)	V_{f4}	200,00	95,70		

Die Standardabweichung für die Trennwerkzeuge bei einer Drehzahl von 50 min⁻¹ liegt bei 2,35 °C, d.h. die Temperaturen streuen lediglich um 2,35 °C um den Mittelwert von 66,05 °C. Bei einer Drehzahl von 200 min⁻¹ ist die Standardabweichung zwischen SF1 (HSS) und KSB1 (HSS) mit 3,10 °C am größten. Aus den niedrigen Abweichungen lässt sich ableiten, dass in der Wärmeentwicklung und damit in der Standzeit der beiden Trennwerkzeuge keine wesentlichen Unterschiede identifiziert werden können.

Ein Grund für die annähernd identische Temperaturentwicklung für SF1 (HSS) und KSB1 (HSS) ist die Schnittkraftentwicklung. In Abbildung 5.31 sind die durchschnittlichen und maximalen Schnittkräfte zu den in Abbildung 5.29 bzw. Tabelle 5.11 aufgeführten Temperaturen grafisch abgebildet. Bei beiden Trennwerkzeugen liegen die Schnittkräfte (Durchschnitt und

Maximum) in derselben Größenordnung. Die Datenwerte der einzelnen Versuche gibt Tabelle 5.12 wieder.

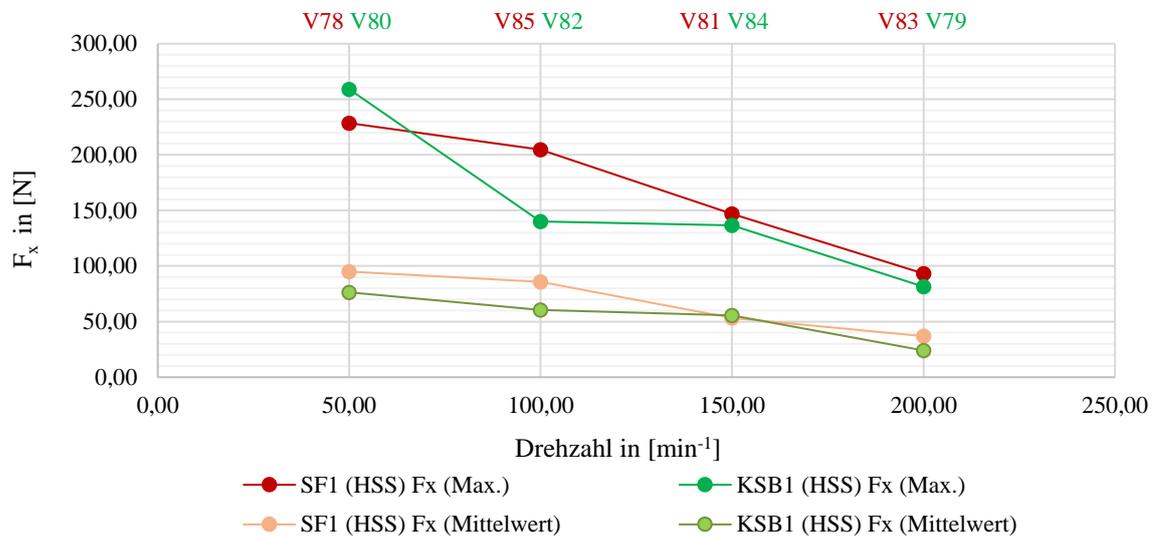


Abbildung 5.31: Schnittkraftentwicklung für KSB1 (HSS) und SF1 (HSS) an Werkstück 2 bei V_{f4}

Die Standardabweichung für die durchschnittlichen Schnittkräfte über die Versuchszeit zwischen KSB1 (HSS) und SF1 (HSS) beträgt je nach Drehzahl zwischen 1,11 N und 12,66 N. Die kleinste Standardabweichung wird bei einer Drehzahl von 150 min⁻¹ erreicht. Für die Schnittkraft $F_{x(\text{Max.})}$ sind die Standardabweichungen, zu vergleichen in Tabelle 5.12, etwas höher und liegen je nach Drehzahl zwischen 5,27 N und 32,30 N. Die Abweichungen für $F_{x(\text{Max.})}$ lassen sich mit einem kurzzeitigen Verkanten der Werkzeuge im Werkstück begründen.

Tabelle 5.12: Standardabweichung Schnittkraft SF1 (HSS) und KSB1 (HSS)

Eingangsgrößen				Ausgangsgrößen					
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschub/Drehzahl [min ⁻¹]	F _x (Max.) [N]	\bar{x} [N]	σ [N]	F _x (Mittelw.) [N]	\bar{x} [N]	σ [N]
78	2	SF1 (HSS)	V_{f4} 50,00	228,56	243,79	15,23	95,01	85,69	9,33
80	2	KSB1 (HSS)	V_{f4} 50,00	259,01			76,36		
85	2	SF1 (HSS)	V_{f4} 100,00	204,62	172,32	32,30	85,86	73,20	12,66
82	2	KSB1 (HSS)	V_{f4} 100,00	140,02			60,54		
81	2	SF1 (HSS)	V_{f4} 150,00	174,07	141,80	5,27	53,30	54,41	1,11
84	2	KSB1 (HSS)	V_{f4} 150,00	136,53			55,52		
83	2	SF1 (HSS)	V_{f4} 200,00	93,25	87,35	5,90	36,92	30,49	6,43
79	2	KSB1 (HSS)	V_{f4} 200,00	81,45			24,06		

Wie Abbildung 5.31 am Beispiel von KSB1 (HSS) an Werkstück 2 zeigt, sinkt die Schnittkraft bei steigender Drehzahl. Zusammen mit den Daten in Abbildung 5.29, lässt sich die sinkende Schnittkraft mit zunehmender Drehzahl durch die erhöhte Temperatur und der damit einhergehenden Verringerung der Standzeit erklären.

Mit einer sinkenden Schnittkraft infolge einer verringerten Standzeit geht eine Reduzierung des Volumenabtrages einher. In Abbildung 5.32 sind die in den Versuchsreihen erhobenen Daten für die Temperatur an der Werkzeugschneide, Schnittkraft (F_x (Mittelwert)) und Volumenabtrag in Abhängigkeit der Drehzahl am Beispiel von KSB1 (HSS) an Werkstück 2 bei Vorschubgeschwindigkeit V_{f4} zu sehen. Bei Erhöhung der Drehzahl sinkt die Schnittkraft und der Volumenabtrag, während die Standzeit des Sägeblattes durch eine Zunahme der Wärmeentwicklung an der Schneide sinkt.

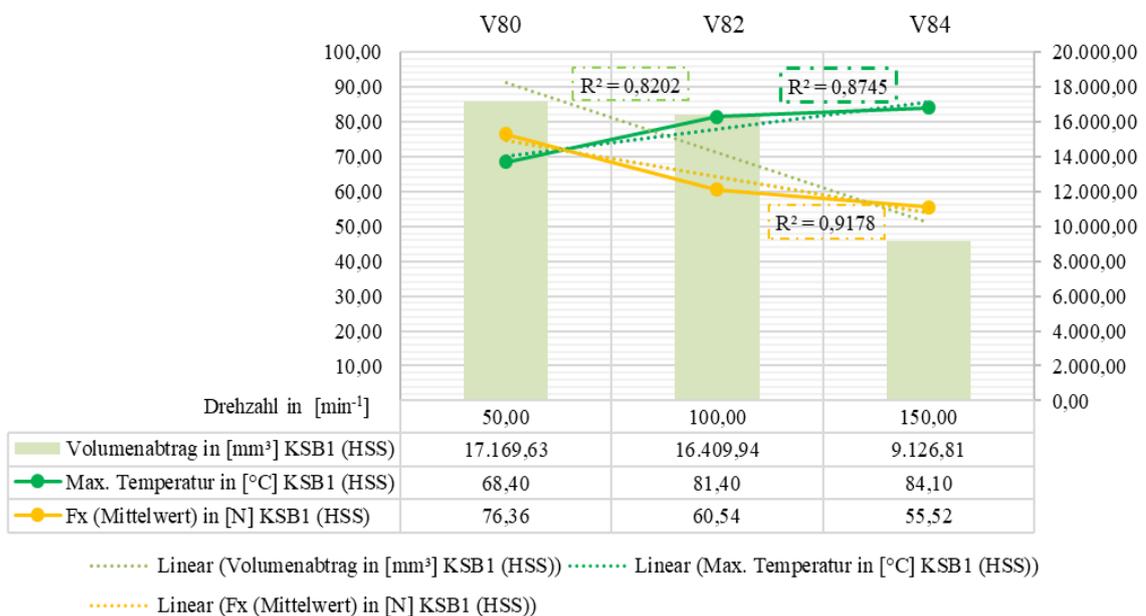


Abbildung 5.32: Vergleich maximale Temperatur, Volumenabtrag und Schnittkraft KSB1 (HSS) an Werkstück 2 bei V_{f4}

Das Bestimmtheitsmaß R^2 für KSB1 (HSS) in Abhängigkeit von der Drehzahl und den untersuchten Zielgrößen liegt für alle Daten nahe 1,0. Die Abhängigkeit zwischen den genannten Zielgrößen und der Drehzahl kann belegt werden. Im Einzelnen ergibt sich das Bestimmtheitsmaß zu:

- $R^2 = 0,8202$ für Drehzahl und Volumenabtrag
- $R^2 = 0,8745$ für Drehzahl und maximale Temperatur an der Werkzeugschneide
- $R^2 = 0,9178$ für Drehzahl und Schnittkraft (F_x (Mittelwert))

Wissenschaftliche Erkenntnisse KSB1 (HSS) und SF1 (HSS)

Durch die Auswertung der drei Zielgrößen für ein Kreissägeblatt und einen Scheibenfräser aus dem Schneidstoff HSS wird ersichtlich, dass

- für die Zielgrößen Standzeit (in Form der maximalen Temperatur an der Schneide, vgl. Abbildung 5.29 und Schnittkraft, vgl. Abbildung 5.31) keine wesentlichen Unterschiede bei der Rohrintrennung festgestellt werden konnten. Sowohl die Wärme- und Schnittkraftentwicklung sind an einem nahtlosen Rohr nahezu identisch und steigen mit zunehmender Drehzahl.
 - eine Abhängigkeit der Zielgrößen besteht. Mit zunehmender Drehzahl reduziert sich die Standzeit der Trennwerkzeuge infolge einer Erhöhung der Temperatur an der Werkzeugschneide. Letzteres führt zu einem erhöhten Werkzeugverschleiß, die Schnittkräfte und der Volumenabtrag sinken.
- ➔ Für die Betriebsparameterwahl in **Forschungsfrage 3** sind unter dem Gesichtspunkt der Maximierung des Volumenabtrages bei einer gleichzeitig hohen Standzeit des Trennwerkzeuges grundsätzlich niedrigere Drehzahlen zu wählen.

Da durch Versuchsreihe 2 keine signifikanten Unterschiede zwischen SF1 (HSS) und KSB1 (HSS) ausgemacht werden konnten, konzentrieren sich die weiteren Analysen auf den Schneidwerkstoff. Es kommen Kreissägeblätter aus HSS und VHM, jeweils beschichtet mit TiAlN, zur Anwendung. Die Eigenschaften und Vorteile einer Beschichtung wurden in Absatz 4.2.1 behandelt. Die Untersuchungen werden exemplarisch an Kreissägeblättern an Werkstück 1 durchgeführt. Eine Übertragung auf Scheibenfräser konnte durch den Vergleich zwischen KSB1 (HSS) und SF1 (HSS) hergestellt werden. Es wird Werkstück 1 gewählt, da in den Vorversuchen Probleme bei der Trennung der Schweißnaht festgestellt werden konnten.

Für Scheibenfräser und Kreissägeblätter kann wie für Trennscheiben der Einfluss einer Längsschweißnaht auf Rohrintrennung festgestellt werden. Da in der Datenauswertung zu Trennscheiben ausführlich auf den Unterschied zwischen nahtlosen und geschweißten Rohrleitungen eingegangen wurde, wird an dieser Stelle auf Anhang B-2 verwiesen. Anhand einer Versuchsreihe an Werkstück 1 und Werkstück 2 werden die Unterschiede an einem Rohr mit und ohne Längsschweißnaht beispielhaft mit KSB1 (HSS) aufgezeigt. Dies ist wichtig zur Beantwortung von **Forschungsfrage 1**.

Versuchsreihe 1: Vergleich Schneidstoffe und Analyse Drehzahl anhand KSB1 (HSS), KSB2 (HSS, TiAlN) und KSB3 (VHM TiAlN)

Der Einfluss einer Werkzeugbeschichtung und die Unterschiede zwischen den Schneidstoffen HSS und VHM bei der Rohrintrennung werden mittels KSB2 (HSS, TiAlN) und KSB3 (VHM, TiAlN), deren Ergebnisse KSB1 (HSS) gegenübergestellt werden, untersucht.

Die Drehzahlen für die zwei beschichteten Kreissägeblätter (KSB2 + KSB3) in den Versuchsreihen sind höher wie für das unbeschichtete Sägeblatt (KSB1). Dies ist mit Abbildung 4.3 zu begründen. Hieraus geht hervor, dass die Schnittgeschwindigkeiten und damit einhergehend die Drehzahlen für Trennwerkzeuge mit Beschichtung höher gewählt werden können wie für unbeschichtete Schneidstoffe.

Das Diagramm in Abbildung 5.33 stellt die generierten Daten für die maximale Temperatur an der Werkzeugschneide für KSB1 (HSS), KSB2 (HSS, TiAlN) und KSB3 (VHM, TiAlN) an Werkstück 1 bei V_{f3} für jeweils drei Drehzahlen dar. Trotz der Versuchsdurchführung an Werkstück 1 und damit einhergehenden Schwankungen, kann als erstes Ergebnis für den Schneidstoff

HSS ohne Werkzeugbeschichtung die höchste und für den Schneidstoff VHM mit Werkzeugbeschichtung die niedrigste Temperatur an der Werkzeugschneide festgestellt werden³⁰.

Anhand Abbildung 5.33 wird wie bei den Ergebnissen an Werkstück 2 (vgl. Abbildung 5.29) ersichtlich, dass grundsätzlich eine niedrigere Drehzahl zur Rohrintrennung gewählt werden sollte. Mit zunehmender Drehzahl sinkt die Standzeit der Kreissägeblätter. Kommen beschichtete Schneidstoffe zum Einsatz, kann die Rohrintrennung mit höheren Drehzahlen vollzogen werden. Gemäß den Daten in Abbildung 5.33 weist KSB 3 (VHM, TiAlN) die geringste Temperatur und damit die höchste Standzeit auf. Diese Erkenntnis ist für die Betriebsparameterwahl und zur Beantwortung von **Forschungsfrage 3** relevant. Allerdings müssen noch die Zielgrößen Volumenabtrag und Schnittkraft analysiert werden.

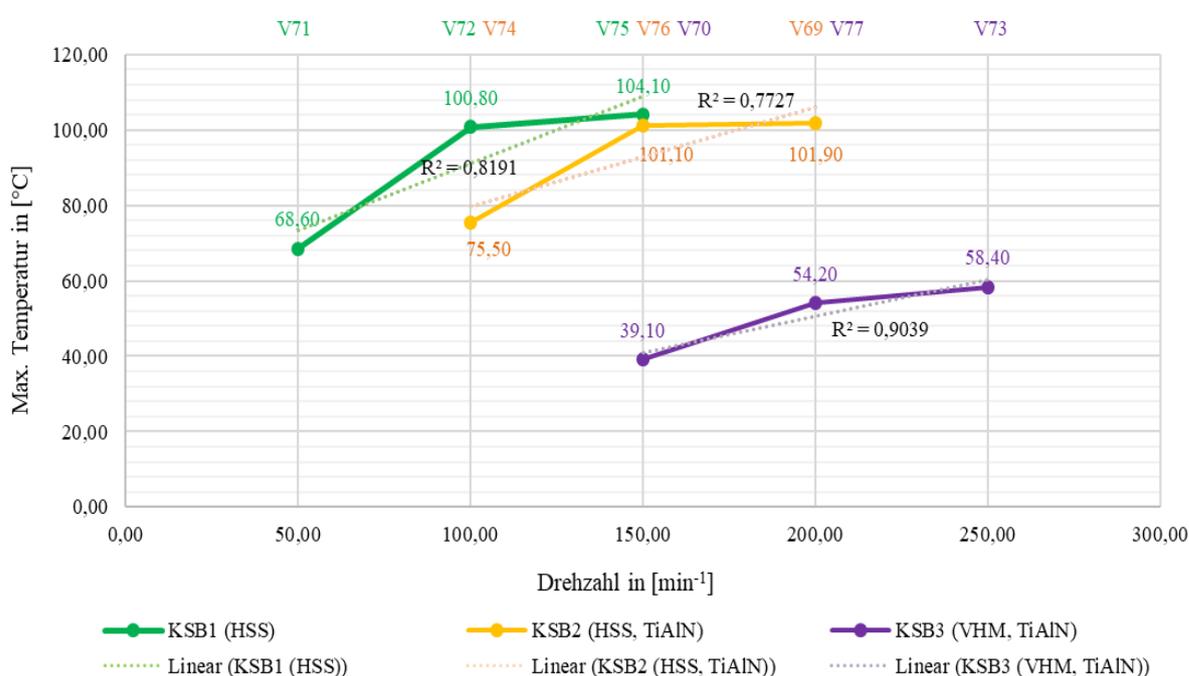


Abbildung 5.33: Vergleich maximale Temperatur für unterschiedliche Schneidstoffe sowie mit/ohne Werkzeugbeschichtung an Werkstück 1 bei V_{f3}

Nach den erhobenen Daten zur Rohrintrennung in Abbildung 5.33 gilt:

$$\begin{aligned}
 & \text{Wärmeentwicklung KSB3 (VHM, TiAlN)} < \text{Wärmeentwicklung KSB2 (HSS, TiAlN)} \\
 & < \text{Wärmeentwicklung KSB1 (HSS)} \\
 & \text{Standzeit KSB3 (VHM, TiAl)} > \text{Standzeit KSB2 (HSS, TiAlN)} \\
 & > \text{Standzeit KSB1 (HSS)}
 \end{aligned}$$

³⁰ KSB1 weist eine Scheibenbreite von 3 mm und KSB2/KSB3 von 2 mm auf. Daher ist ein direkter Vergleich der ermittelten Temperaturen nicht möglich. Bei KSB1 verteilt sich die Wärmeentwicklung auf breitere Zähne. Die erhobenen Temperaturen an KSB1 müssten bei einer Scheibenbreite von nur 2 mm etwas höher sein.

Die Ergebnisse stimmen mit der Literatur (vgl. Abbildung 4.3) überein. Die Methodik zur Ermittlung der Standzeit sowie die Funktion des entwickelten Versuchsstandes zur Rohrintrennung können dadurch bestätigt werden.

Mathematische Auswertung:

Die Trendlinie und das Bestimmtheitsmaß R^2 in Abhängigkeit der Drehzahl und der maximalen Temperatur für KSB1 – KSB3 liegen alle nahe 1,0. Dies entspricht einem Regressionsansatz mit guter Annäherung.

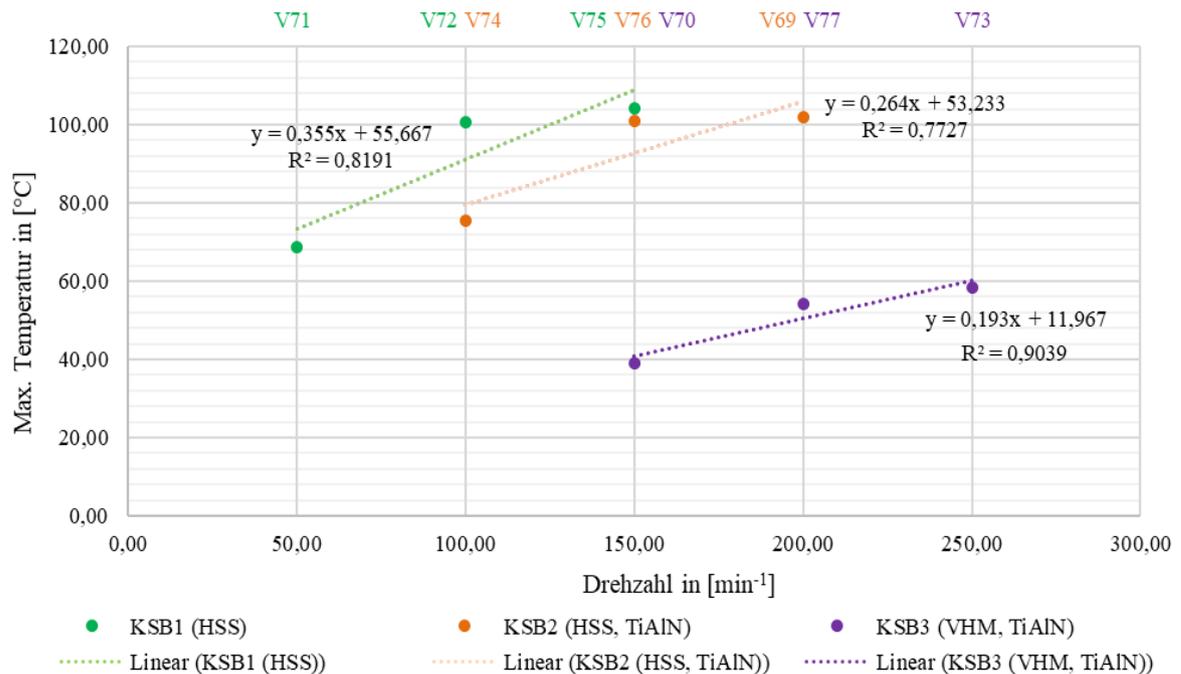


Abbildung 5.34: Lineare Regression Drehzahl und Temperaturentwicklung für KSB1 – KSB3 an Werkstück 1 bei V_{f3}

Der Zusammenhang zwischen Drehzahl und der Wärmeentwicklung an Werkstück 1 bei V_{f3} kann durch folgende Gleichungen ausgedrückt werden:

- KSB1 (HSS): $y = 0,355x + 55,667$
- KSB2 (HSS, TiAlN): $y = 0,264x + 53,233$
- KSB3 (VHM, TiAlN): $y = 0,193x + 11,967$

Die Steigung von KSB1 (HSS) mit $m = 0,355$ [-] ist gegenüber KSB2 (HSS, TiAlN) und KSB3 (VHM, TiAlN) am größten. Demnach wirkt sich eine Drehzahlerhöhung bei Schnellarbeitsstahl ohne Beschichtung am stärksten auf die Temperatur an der Werkzeugschneide und damit auf die Standzeit aus. In Absatz 5.1.3 wurde die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes und die lineare Regression unter Angaben der entsprechenden Formeln eingeführt.

Wie bereits im Rahmen der Datenauswertung von Versuchsreihe 2 am Beispiel von SF1 (HSS) und KSB1 (HSS) aufgezeigt, sinken die Schnittkräfte mit zunehmender Drehzahl. Abbildung 5.35 gibt die zugehörigen Schnittkräfte (F_x (Mittelwert)) für die Versuchsnummern in Abbildung 5.33 wieder.

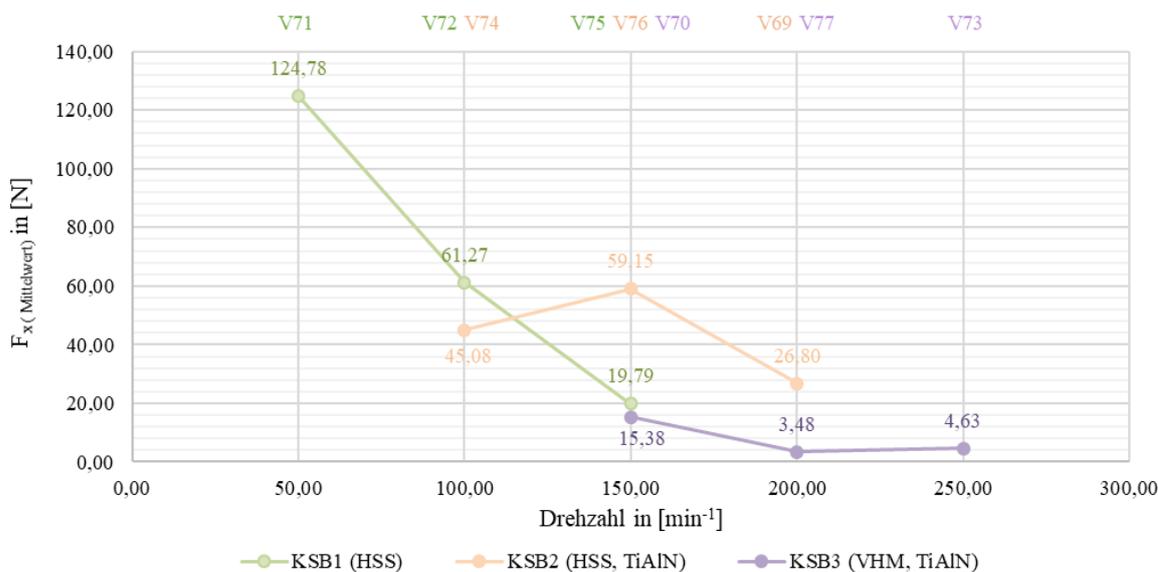


Abbildung 5.35: Vergleich Schnittkraft für unterschiedliche Schneidstoffe sowie mit/ohne Werkzeugbeschichtung an Werkstück 1 bei V_{f3}

Wie anhand von Versuchsreihe 2 gezeigt (vgl. Abbildung 5.32) sinkt mit abnehmender Schnittkraft auch der Volumenabtrag. Unter diesem Gesichtspunkt ist der Schneidstoff HSS besser als VHM zur Rohrinrentrennung von Rohrleitungen aus dem Werkstoff 1.4541 geeignet. Dies stimmt mit den Angaben der Stahlhandel Grödlitz GmbH [90] überein.

Grundsätzlich haben die Versuchsreihen und die Datenauswertung gezeigt, dass sowohl KSB1 (HSS) als auch KSB2 (HSS, TiAlN) zur Rohrinrentrennung geeignet sind. Unter dem Aspekt der Standzeitoptimierung ist der Schneidstoff HSS mit einer Werkzeugbeschichtung gegenüber HSS ohne Werkzeugbeschichtung zu bevorzugen. Infolge der Werkzeugbeschichtung ist die Temperatur an der Schneide bei gleicher Drehzahl bei KSB2 (HSS, TiAlN) geringer als bei KSB1 (HSS).

Allerdings sind die Anschaffungskosten für KSB2 (HSS, TiAlN) etwa dreimal so hoch wie für KSB1 (HSS), daher muss zwischen Standzeit und Kosten abgewogen werden. Wie Tabelle 4.3 zu entnehmen ist, betragen die Kosten für KSB1 (HSS) 94,96 € und für KSB2 (HSS, TiAlN) 297,50 €.

Wissenschaftliche Erkenntnisse Schneidstoff und Drehzahl:

Im Rahmen der Datenauswertung zur Rohrinrentrennung mittels Kreissägeblättern aus unterschiedlichen Schneidstoffen können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Der Schneidstoff und eine Werkzeugbeschichtung des Trennwerkzeuges haben Auswirkungen auf die Standzeit und damit verbunden auf die Schnittkraftentwicklung und den Volumenabtrag während der Rohrinrentrennung.
- Die maximal gemessene Temperatur an der Werkzeugschneide bei KSB1 (HSS) ist höher als an KSB2 (HSS, TiAlN) und bei KSB3 (VHM, TiAlN), zu sehen in Abbildung 5.33. Die höhere Standzeit von KSB2 (HSS, TiAlN) gegenüber KSB1 (HSS) liegt an der

Werkzeugbeschichtung mit TiAlN von KSB2. Es kann nachgewiesen werden, dass mit einer Beschichtung der Werkzeuge u.a. eine Erhöhung der Standzeit verbunden ist.

- Die maximal gemessenen Temperaturen an der Werkzeugschneide von KSB3 (VHM, TiAlN) sind am geringsten (vgl. Abbildung 5.33). Dies resultiert aus den geringen Schnittkräften und damit verbunden auch aus dem geringen Volumenabtrag. Daraus lässt sich ableiten, dass der Schneidstoff VHM zur Rohrintrennung von Chrom-Nickel-Edelstählen nicht optimal ist.
 - Dahingegen sind Kreissägeblätter aus HSS mit einer Werkzeugbeschichtung zur Rohrintrennung von vorzugsweise Chrom-Nickel-Edelstählen aus Gründen der Standzeit zu bevorzugen. Aus Kostengründen können jedoch auch Kreissägeblätter bzw. Scheibenfräser aus HSS ohne Werkzeugbeschichtung gewählt werden.
- Diese Ergebnisse sind wichtig zur Wahl eines geeigneten Trennwerkzeuges zur Rohrintrennung in **Forschungsfrage 2**.

Abgesehen von den erlangten Erkenntnissen bezüglich des Schneidwerkstoffes können durch die Datenauswertung folgende Aussagen hinsichtlich der Drehzahl zur Rohrintrennung formuliert werden:

- Mit Erhöhung der Drehzahl steigt die maximale Temperatur an der Werkzeugschneide (vgl. Abbildung 5.29). Ein Grund hierfür ist, dass die Schneiden während der Rohrintrennung häufiger im Einsatz sind. Die Standzeit des Werkzeuges verringert sich. Infolge der verringerten Standzeit stumpfen die Zähne ab, weshalb die Schnittkraft und damit einhergehend der Volumenabtrag sinken (vgl. Abbildung 5.31 und Abbildung 5.32).
- Für die Betriebsparameterwahl in **Forschungsfrage 3** sind folglich kleinere Drehzahlen zu wählen.
- Die Steigung der linearen Trendlinie von KSB1 (HSS) für Drehzahl und Temperatur mit $m = 0,355$ [-] in Abbildung 5.34 ist gegenüber KSB2 (HSS, TiAlN) größer. Demnach wirkt sich eine Drehzahlerhöhung bei Schnellarbeitsstahl ohne Beschichtung am stärksten auf die Temperatur an der Werkzeugschneide und damit auf die Standzeit aus.
- Bei der Betriebsparameterwahl in **Forschungsfrage 3** sind demnach die Drehzahlen für KSB1 (HSS) kleiner (z.B. 50 min^{-1}) wie für KSB2 (HSS, TiAlN) (z.B. 100 min^{-1}) zu wählen.

Da während den Versuchsreihen Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit variiert werden, wird nachfolgend der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Rohrintrennung am Beispiel von KSB2 (HSS, TiAlN) untersucht. Abschließend kann eine Empfehlung für die Betriebsparameter Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit formuliert werden.

Versuchsreihe 1: Analyse Vorschubgeschwindigkeit anhand KSB2 (HSS, TiAlN)

Wie bereits durch die Vorversuche am Beispiel der Schnittkraft F_x (Max.) anhand von KSB1 (HSS) gezeigt werden konnte, steigen die Schnittkräfte mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit. Diese Aussage kann durch die Daten für KSB2 (HSS, TiAlN) in Abbildung 5.36 bestätigt werden. Auf der Abszisse sind die Vorschubgeschwindigkeiten V_{f2} bis V_{f4} und auf der Ordinate die Schnittkräfte F_x (Mittelwert) für die Drehzahlen 100 min^{-1} und 200 min^{-1} zu sehen. Es ist zu erkennen, dass mit einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit die Schnittkräfte stei-

gen, wobei letztere für geringere Drehzahlen höher sind. Auch dies stimmt mit den Ergebnissen der Vorversuche überein.

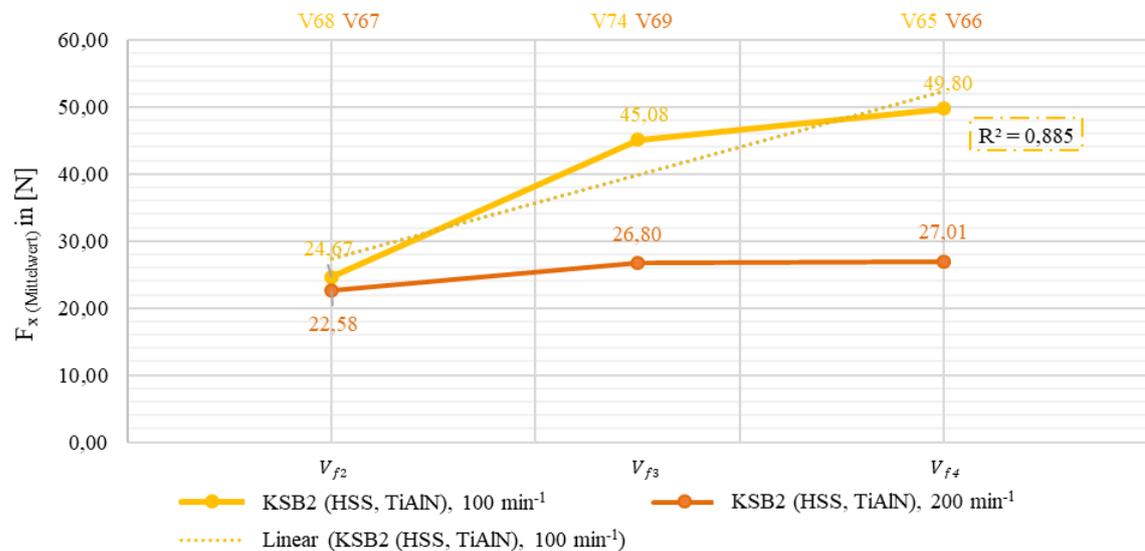


Abbildung 5.36: Schnittkraftentwicklung für KSB2 (HSS) in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl an Werkstück 1

Mit Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit und Schnittkraft steigt wiederum der Volumenabtrag der zu trennenden Rohrleitung (vgl. Absatz 5.1.3). Neben der steigenden Schnittkraft führt die höhere Standzeit des Trennwerkzeuges zu einem höheren Volumenabtrag. In Abbildung 5.37 sind hierzu die maximale Temperatur an der Werkzeugschneide in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit aufgetragen. Die Temperatur ist bei einer Drehzahl von 100 min⁻¹ für KSB2 (HSS, TiAlN) bei V_{f4} mit 51,5 °C am geringsten.

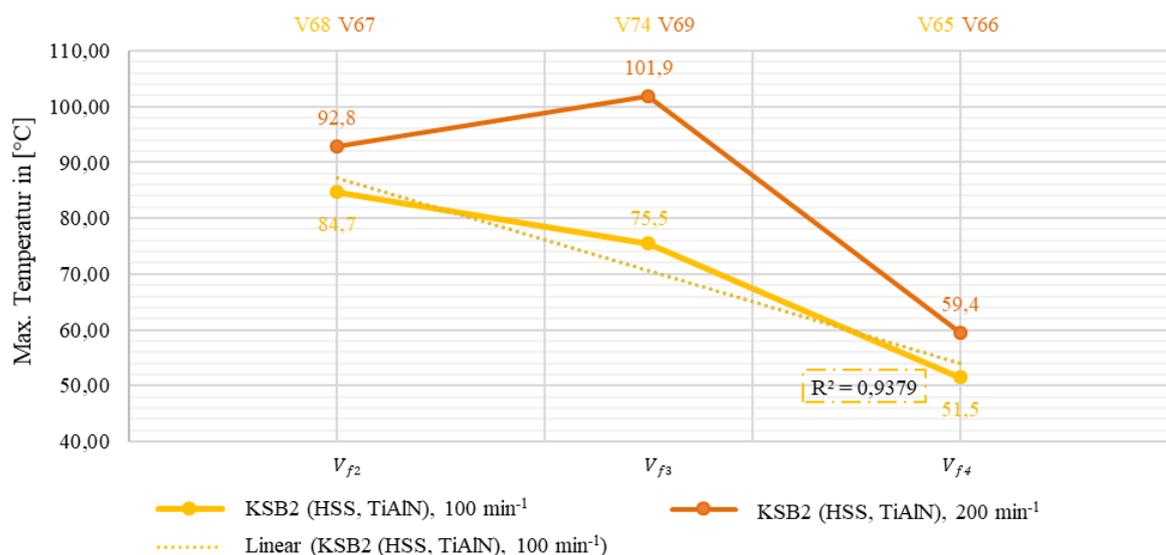


Abbildung 5.37: Maximale Temperatur in Abhängigkeit der Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit an Werkstück 1 mit KSB2 (HSS, TiAlN)

Dies lässt sich wie folgt begründen: Bei einer geringeren Vorschubgeschwindigkeit ist jeder Zahn von KSB2 (HSS, TiAlN) während der Versuchsdurchführung öfter im Eingriff. Infolgedessen steigt die maximal gemessene Temperatur an der Werkzeugschneide. Dahingegen ist bei einer höheren Vorschubgeschwindigkeit jeder Zahn seltener im Eingriff. Hieraus resultiert eine niedrigere Temperatur an der Schneide und die Standzeit des Kreissägeblattes steigt.

Der Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Temperatur sowie zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Schnittkraft (F_x (Mittelwert)) kann durch eine sehr gute Annäherung an die jeweiligen Trendlinien bestätigt werden. Exemplarisch wurde die Trendlinie und das Bestimmtheitsmaß für eine Drehzahl von 100 min^{-1} gebildet. Bei Versuch 69 ist eine Messabweichung für die maximale Temperatur zu beobachten, wodurch das Bestimmtheitsmaß verfälscht werden würde. Die Temperatur bei Vorschubgeschwindigkeit V_{f3} ist mit $101,9 \text{ °C}$ etwas zu hoch.

Hinsichtlich der Standzeit des Trennwerkzeuges ist demnach für die Rohrintrennung prinzipiell eine geringere Drehzahl bei einer gleichzeitig höheren Vorschubgeschwindigkeit zu wählen.

Wissenschaftliche Erkenntnisse Vorschubgeschwindigkeit:

Durch die Versuchsdurchführung und Datenauswertung der Zielgrößen an KSB2 (HSS, TiAlN) konnte nachgewiesen werden, dass eine höhere Vorschubgeschwindigkeit zur Rohrintrennung für Kreissägeblätter und damit einhergehend auch für Scheibenfräser zu wählen ist. Dies lässt sich wie folgt begründen:

- Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit steigt die Schnittkraft während des Trennprozesses und damit verbunden auch der Volumenabtrag (vgl. Abbildung 5.36).
 - Bei Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit sinkt die maximale Temperatur an der Werkzeugschneide (vgl. Abbildung 5.37), d.h. die Standzeit des Trennwerkzeuges erhöht sich mit Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit. Dies ist eine Begründung dafür, weshalb die Schnittkraft und der Volumenabtrag mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ebenfalls steigen.
 - Bei niedrigeren Vorschubgeschwindigkeiten verringert sich die Standzeit des Trennwerkzeuges und die Schneiden stumpfen ab. Hieraus resultieren niedrigere Schnittkräfte und ein reduzierter Volumenabtrag. Eine Erklärung hierfür ist, dass bei einer geringeren Vorschubgeschwindigkeit jeder Zahn während der Rohrintrennung öfter im Eingriff ist und die maximal gemessene Temperatur an der Werkzeugschneide steigt.
 - Bei einer höheren Vorschubgeschwindigkeit ist jeder Zahn seltener im Eingriff, woraus eine niedrigere Temperatur an der Schneide resultiert und die Standzeit des Trennwerkzeuges steigt.
- Diese wissenschaftlichen Erkenntnisse liefern einen wesentlichen Beitrag zur Betriebsparameterwahl für Kreissägeblätter und Scheibenfräser in **Forschungsfrage 3**.

5.2.4 Zusammenfassender Vergleich Scheibenfräser/ Kreissägeblätter und Betriebsparameterwahl

Durch die experimentellen Versuchsreihen mit Scheibenfräser und Kreissägeblättern in Kombination mit der sich daran anschließenden Datenauswertung konnte wie für Trennscheiben die Eignung der Messtechnik und Methodik nachgewiesen werden. Trotz einzelner Messabweichungen, die vorwiegend auf die Ovalität geschweißter Rohrleitungen zurückzuführen sind, konnten die drei Forschungsfragen beantwortet und durch entsprechende mathematische Auswertungen belegt werden. In Anhang B-1.2 ist ein Nachweis zur Genauigkeit bzw. Wiederholbarkeit der Versuchsreihen am Beispiel der Schnittkraftentwicklung aufgeführt.

Durch Versuchsreihe 2 konnte gezeigt werden, dass zwischen KSB1 (HSS) und SF1 (HSS) keine nennenswerten Unterschiede bei der Rohrintrennung bestehen. Davon ausgehend wurden die weiteren Untersuchungen hinsichtlich des Schneidwerkstoffs und der Drehzahl bzw. Vorschubgeschwindigkeit exemplarisch für Kreissägeblätter ausgeführt. Es wird angenommen, dass sich die Ergebnisse von Versuchsreihe 2 auch auf den Schneidstoff HSS mit Werkzeugbeschichtung übertragen lassen. Folglich sollten die ausgesprochenen Betriebsparameter für KSB2 (HSS, TiAlN) auch für einen Scheibenfräser aus demselben Schneidwerkstoff mit Beschichtung gelten, sofern die Abmessungen der Trennwerkzeuge identisch sind.

Anhand eines Vergleichs von Versuchsreihe 1 und 2 konnte der Einfluss einer Längsschweißnaht auf die Rohrintrennung mittels Kreissägeblättern nachgewiesen werden (vgl. Anhang B-2). Im Gegensatz zur Rohrintrennung mit Trennscheiben, sind die Schwankungen an Werkstück 1 mit einem Kreissägeblatt jedoch kleiner wie bei der Rohrintrennung mittels Trennscheiben. Eine Begründung hierfür könnte in den höheren Schnittkräften von Kreissägeblättern und Scheibenfräsern gegenüber Trennscheiben liegen.

Die Versuchsreihen wurden maßgeblich an einer Rohrleitung aus dem Werkstoff 1.4541 mit einem Außendurchmesser von 219,1 mm durchgeführt. Angaben zur Übertragbarkeit auf einen größeren Rohrdurchmesser und einen warmfesten, unlegierten Baustahl sind aus Gründen der Übersichtlichkeit Anhang B-2 und B-3 zu entnehmen.

Im Folgenden werden Empfehlungen für die Betriebsparameterwahl für Kreissägeblätter aus HSS mit und ohne Werkzeugbeschichtung ausgesprochen. Es werden für beide Schneidwerkstoffe Betriebsparameter formuliert, da sich die Anschaffungskosten der Trennwerkzeuge um den Faktor drei unterscheiden. Mit beiden Schneidwerkstoffen kann die Rohrintrennung freiliegender Rohrleitungen erfolgreich durchgeführt werden.

Betriebsparameterwahl Kreissägeblatt, Schneidstoff HSS, Beschichtung TiAlN

Unter dem Gesichtspunkt der Maximierung des Volumenabtrages bei einer gleichzeitig hohen Standzeit werden basierend auf den experimentellen Versuchsreihen zur Rohrintrennung mittels einem Kreissägeblatt (HSS, TiAlN) folgende Empfehlungen für die Betriebsparameter ausgesprochen:

- Vorschubgeschwindigkeit: V_{f4}

Die Wahl der Vorschubgeschwindigkeit lässt sich mit einer Zunahme der Schnittkräfte mit steigender Vorschubgeschwindigkeit begründen. Gleichzeitig steigt die Standzeit, da die Temperatur an den Werkzeugschneiden sinkt. Zurückzuführen ist dies darauf, dass bei einer höheren Vorschubgeschwindigkeit jeder Zahn des Trennwerkzeuges seltener im Eingriff ist und sich dadurch eine geringere Schneidtemperatur entwickelt.

- Umfangsgeschwindigkeit V_c : 0,65 m/s

Die Umfangsgeschwindigkeit V_c ergibt sich aus (1.0):

$$V_c = n * d * \pi \quad (1.0)$$

mit den Eingangsgrößen:

- Drehzahl n : 100 min^{-1}
- Scheibendurchmesser d : 125 mm

zu:

$$V_c = 100 \text{ min}^{-1} * 125 \text{ mm} * \pi$$

$$V_c = 0,65 \text{ m/s}$$

Die Betriebsparameter gelten für ein Kreissägeblatt aus Schnellarbeitsstahl mit einer Beschichtung aus Titanaluminiumnitrid mit den Eingangsgrößen:

- Scheibendurchmesser: 125 mm
- Scheibenbreite: 2 mm

Betriebsparameterwahl Kreissägeblatt/Scheibenfräser, Schneidstoff HSS

Auf Basis der Daten in Abbildung 5.33 sind die Drehzahlen für ein Kreissägeblatt bzw. Scheibenfräser aus HSS ohne Beschichtung geringer zu wählen wie für Trennwerkzeuge mit Werkzeugbeschichtung. Daraus ergibt sich:

- Umfangsgeschwindigkeit V_c : 0,33 m/s

mit den Eingangsgrößen:

- Drehzahl n : 50 min^{-1}
- Scheibendurchmesser d : 125 mm

zu:

$$V_c = 50 \text{ min}^{-1} * 125 \text{ mm} * \pi$$

$$V_c = 0,33 \text{ m/s}$$

Die Betriebsparameter gelten für ein Kreissägeblatt oder Scheibenfräser aus Schnellarbeitsstahl mit den Eingangsgrößen:

- Scheibendurchmesser: 125 mm
- Scheibenbreite: 2 mm

Die Angaben und Begründungen zu Wahl der Vorschubgeschwindigkeit sind identisch zu einem Kreissägeblatt mit Schneidstoff HSS und einer Werkzeugbeschichtung aus TiAlN.

In Tabelle 5.13 sind die Empfehlungen zur Betriebsparameterwahl für Kreissägeblätter und Scheibenfräser zusammengefasst.

Tabelle 5.13: Betriebsparameterwahl und Anwendungsempfehlungen Kreissägeblätter/Scheibenfräser

Trennwerkzeug	KSB2 (HSS, TiAlN)	KSB1 (HSS), SF1 (HSS)
Vorschubgeschwindigkeit V_f	V_{f4}	V_{f4}
Umfangsgeschwindigkeit V_c	0,65 m/s	0,33 m/s
Drehzahl	100 min ⁻¹	50 min ⁻¹
Empfohlener Anwendungsbereich		
Werkstoff	Chrom-Nickel-Edelstahl, unlegierter/warmfester Stahl	
Erzeugnisform	nahtlose Rohrleitungen, geschweißte Rohrleitungen	
Einbaulage	freiliegende Rohrleitungen	

Es folgt die Validierung durch Versuchsreihen mit einem durch die Siempelkamp NIS GmbH entwickelten Prototyp zur Rohrintrennung.

5.2.5 Validierungsversuche mit Prototyp

Im Rahmen des Projektes „RoTre“ wurde ein Prototyp zur Rohrintrennung, der auf Scheibenfräser und Kreissägeblätter ausgelegt ist, entwickelt. Im Folgenden wird dessen Funktion beschrieben und der Nachweis der Praxistauglichkeit durch Validationsversuche erbracht. Die Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit ist jedoch nicht Teil dieser Dissertation, sondern oblag innerhalb des Projektes „RoTre“ der Firma Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH.

5.2.5.1 Funktionsbeschreibung Prototyp zur Rohrintrennung

Basierend auf den in den experimentellen Versuchsreihen generierten Daten und der anschließenden Datenanalyse, konnte der in Abbildung 5.38 dargestellte Prototyp zur Rohrintrennung mit einer Gesamtlänge von 1,14 m und einem Durchmesser von ca. 0,2 m entwickelt werden. Der Prototyp eignet sich unter Verwendung eines Scheibenfräasers oder Kreissägeblatts zur Rohrintrennung von Rohrleitungen aus (Edel-)stahl mit einem Innendurchmesser von 205 - 360 mm (max. Spannweite Verspanneinheit) und einem Rohraußendurchmesser von max. 415 mm. Die maximal zu trennende Wandstärke umfasst 35 mm. Eine Absaugung der anfallenden Späne während dem Trennprozess kann durch ein zentrales, durchgehendes Hohl-Rohr realisiert werden. Es folgt eine kurze Funktionsbeschreibung, detailliertere Angaben sind in Anhang C zu finden.

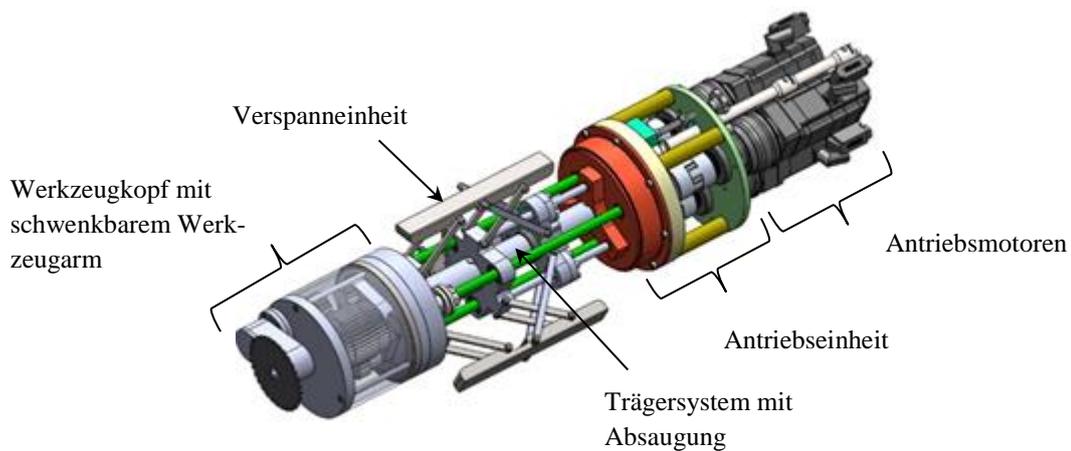


Abbildung 5.38: Schematische Darstellung des Prototyps zur Rohrrinntrennung, nach [145, S. 17]

Die Verspannung und Zentrierung des Prototyps im Rohr wird durch drei, jeweils um 120° versetzte Spannbalken umgesetzt. Nach Angaben der Firma *Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH* [145, S. 18] ist „das Spannsystem [...] über einen beweglichen und zentralen Führungsschlitten verbunden, welcher mittels drei simultan angetriebener Trapezgewindespindeln über ein Zwischengetriebe bewegt wird. Die Verspannung erfolgt manuell über einen Adapter am Zwischengetriebe.“

Der Trennvorgang wird vollautomatisiert, wodurch die Möglichkeit zur Fernhandlung gegeben ist, durchgeführt. Die Steuerung des Prototyps wird durch eine hierfür entwickelte Software umgesetzt. Vor einem Trennvorgang sind die geometrischen Daten der zur trennenden Rohrleitungen inklusive der einzelnen Parameter wie Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl des Trennwerkzeuges durch das Bedienpersonal in das Programm einzugeben.

Am Werkzeugkopf des Prototyps ist der schwenkbare Werkzeugarm mit einem innenliegenden Werkzeugantrieb montiert. Im Inneren des Werkzeugkopfes befindet sich ein Getriebe für die Umsetzung des Werkzeugantriebes und der Vorschubbewegung. Auf der Werkzeugwelle des Werkzeugarmes können sowohl Scheibenfräser wie auch Kreissägeblätter angebracht werden. Da der Prototyp im aktuellen Entwicklungsstadium nicht mit einer Sensorik zur Schnittüberwachung ausgestattet ist, ist die Trennung von in Beton verlegten Rohrleitungen nicht möglich. Grund hierfür ist, dass die beiden genannten Werkzeuge bei einem Kontakt mit Beton direkt abstumpfen. Ohne eine Sensorik zur Restwanddickenbestimmung ist das Trennen von Rohrleitungen in Beton u.a. aus Kostengründen der Trennwerkzeuge daher nicht zu empfehlen.

Bei einer Trennung von Rohrleitungen mit Einbaulage in Beton sind zudem, wie in Versuchsreihe 5 in Absatz 5.1.3 beschrieben, Trennscheiben mit Schleifmittel Diamant geeigneter. Die Antriebsmotoren sind jedoch nicht auf die Drehzahlen für Trennscheiben ausgelegt. Hierfür ist weitere Konstruktionsarbeit notwendig. Die nachfolgend beschriebenen Validationsversuche mit dem Prototyp können daher nur für Scheibenfräser und Kreissägeblätter durchgeführt werden.

5.2.5.2 Durchführung Validationsversuche mit Prototyp

Um die Funktionalität des Prototyps zur Rohrrinntrennung und damit die Übertragbarkeit der Ergebnisse der ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen überprüfen zu können, werden Validationsversuche in der Versuchshalle des TMB durchgeführt. Vorab musste hierfür eine neue Rahmenkonstruktion gefertigt werden. Ein Werkzeugschlitten mit einem Antriebsmotor der Trennwerkzeuge und einer Übersetzung der Vorschubgeschwindigkeit ist irrelevant, da der Trennvorgang nun durch das Rohrrinntrennsystem realisiert werden kann.

Aufgrund des Eigengewichts des Prototyps von ca. 85 kg, wird zur einfacheren Handhabung ein Mobilkran zur Positionierung des Prototyps verwendet. Hierfür ist an der Oberseite des Prototyps eine Kranöse angebracht. Sobald die Rohrrinntrennvorrichtung manuell über die Verspanneinheit im Rohr zentriert und fixiert ist, kann der Mobilkran entfernt werden, da der Trennvorgang automatisiert erfolgt. Die Halterung des Prototyps durch den Mobilkran ist schematisch in Abbildung 5.39 zu sehen.

In den Validationsversuchen wurden Testreihen an drei unterschiedlichen Rohrdurchmessern und Werkstoffen mit SF1 (HSS), KSB1 (HSS) und KSB2 (HSS, TiAlN) durchgeführt. Tabelle 5.14 sind die Daten der Werkstücke zu entnehmen. Die Werkstücke haben jeweils eine Länge von 1,5 m. Während den Vor- und Hauptversuchen wurden Werkstücke mit einer Länge von 0,5 m verwendet.



Abbildung 5.39: Schematische Darstellung Prototyp an Mobilkran [145, S. 23]

Tabelle 5.14: Daten Werkstücke Validierungsversuche

Nr.	Kurzname	Werkstoffnummer	Außendurchmesser d_A [mm]	Wanddicke w [mm]	Innendurchmesser d_I [mm]	Ausführung
A	X6 CrNiTi 18 10	1.4541	219,1	6,3	206,5	geschweißt
B	X6 CrNiTi 18 10	1.4541	355,0	6,3	342,4	geschweißt
C	PG235GH	1.0345	219,1	6,3	206,5	nahtlos
D	PG235GH	1.0345	273,0	6,3	260,4	nahtlos

In Abbildung 5.40 links ist das Rohrrinntrennsystem während des Trennvorgangs an Werkstück C und rechts an Werkstück B zu sehen. Bei Werkstück A und C, bei denen der Rohrendurchmesser jeweils 206,5 mm beträgt, befindet sich die Antriebseinheit außerhalb der zu trennenden Rohrleitung (vgl. Abbildung 5.40 links). Bei Werkstück B und D verspannt sich der Prototyp samt Antriebssystem in der Rohrleitung (vgl. Abbildung 5.40 rechts).

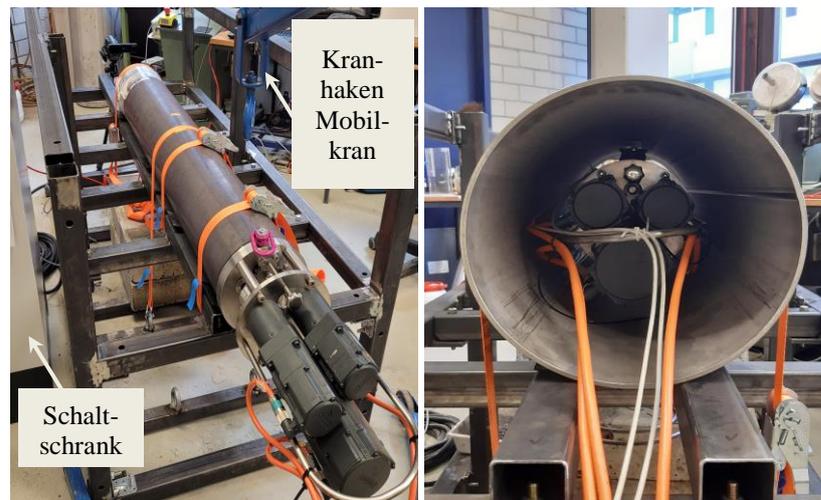


Abbildung 5.40: Versuchsdurchführung mit Prototyp an - links: Werkstück C; rechts: Werkstück B

Es konnte nachgewiesen werden, dass die wissenschaftlichen Untersuchungen zur Rohrintrennung auf die Praxis übertragbar sind und der Prototyp nahtlose und geschweißte Rohrleitungen aus Chrom-Nickel-Edelstahl und unlegierten, warmfesten Baustahl mit folgenden geometrischen Randbedingungen trennen kann:

- Rohrinnendurchmesser: 205 - 360 mm
- Max. Rohraußendurchmesser: 415 mm
- Max. Wandstärke: 35 mm

Die erfolgreiche Rohrintrennung von Werkstück D mit SF1 (HSS) über die Spanbildung und das Durchdringen des Rohrleitung bis hin zum abgetrennten Rohrsegment ist in Abbildung 5.41 zu sehen.³¹



Abbildung 5.41: links: Trennvorgang mit Scheibenfräser; mittig: Spanbildung; rechts: abgetrenntes Rohrsegment

³¹ In den Validationsversuchen wurde zum Nachweis der Funktionstauglichkeit des Prototyps das Werkstück komplett durchtrennt.

5.2.5.3 Vergleich Prototyp mit Stand der Technik

Die entwickelte Rohrintrennvorrichtung ermöglicht die Trennung von schwer zugänglichen Rohrleitungen mit unterschiedlichen Durchmessern, Wandstärken und Materialien in beengten Platzverhältnissen. Zusätzlich entfallen durch die Trennung von der Rohrintrennseite das aufwendige Freilegen der Rohrleitung bzw. die Notwendigkeit der Zugänglichkeit von der Rohraußenseite. Hierin liegt ein entscheidender Vorteil im Vergleich zu den auf dem Markt verfügbaren Geräten. Wie im dritten Kapitel „Stand der Technik Rohrtrennung“ aufgezeigt wurde, existieren auf dem Markt vorwiegend Geräte zur Rohraußentrennung.

Laut *Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH* [145, S. 23], wurde der Prototyp so entwickelt, dass weder Schmutz- noch Staubpartikel eindringen können. Lediglich der Bereich der Spanneinheit ist offen, da ansonsten das Zentrieren und Spannen nicht möglich wäre. Eine Dekontamination des Systems nach dem Einsatz in einer kerntechnischen Anlage ist möglich. Positiv auf die Sicherheit für die am Rückbau beteiligten Personen wirkt sich die Absaugung von Spänen und anderen Reststoffen während des Trennvorgangs wie auch die fernhantierte Bedienung aus. Durch die Neuentwicklung ist demnach die Möglichkeit für eine effiziente Trennung von Rohrleitungen von der Innenseite gegeben.

Da es sich um einen Prototyp handelt, besteht weiterer Entwicklungsbedarf, um die Rohrintrennvorrichtung für die Anforderungen im kerntechnischen bzw. konventionellen Bereich zu optimieren. Hierfür sind weitere Konstruktions- und Entwicklungsarbeiten notwendig. Durch die Validationsversuche mit dem entwickelten Prototyp zur Rohrintrennung konnte die Übertragbarkeit der Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihen am Beispiel einer Rohrintrennvorrichtung für Scheibenfräser und Kreissägeblätter nachgewiesen werden.

6 Zusammenfassung

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen ist eine komplexe Aufgabe. Pro Kraftwerk dauert der Rückbau ca. 10 - 15 Jahre und ist mit Kosten von ca. 1 Milliarde € verbunden [4]. Betrachtet man die Rückbaumassen im Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich, fallen mehr als 63 t an Rohrleitungen je Anlage an [5]. Nach aktuellem Stand der Technik existieren auf dem Markt vorwiegend Geräte zur Rohraußentrennung, welche in beengten Platzverhältnissen oder für die Trennung von in Beton verlegten Rohrleitungen nicht angewendet werden können.

Die vorliegende Arbeit zielt daher auf die Untersuchung der Betriebsparameter zur Entwicklung eines Rohrintrennsystems ab, welches die Trennung schwer zugänglicher Rohrleitungen von der Rohrintenseite aus erlaubt. Als Trennwerkzeuge sollen Scheibenfräser, Kreissägeblätter oder Trennscheiben zum Einsatz kommen. Zu Beginn der Arbeit wurden drei Forschungsfragen definiert, welche durch die experimentellen Versuchsreihen zur Rohrintrennung und die wissenschaftliche Auswertung der generierten Daten beantwortet werden konnten. Für die Analyse der Zielgrößen – Schnittkraft, Volumenabtrag, Massenverlust, Wärmeentwicklung an der Werkzeugschneide und Staubkonzentration – wurde die entsprechende Messtechnik gewählt und je Zielgröße eine geeignete Methodik zur Datenanalyse identifiziert. Die Entwicklung und Konstruktion eines Versuchsstandes zur Rohrintrennung, an welchem verschiedene Werkstücke und Trennwerkzeuge untersucht werden können, war ebenfalls Teil der Arbeit.

Im Vorfeld der experimentellen Versuchsdurchführung wurde eine ausführliche Grundlagenrecherche zu den in kerntechnischen Anlagen eingebauten Rohrleitungen durchgeführt. Der Fokus lag hierbei auf den verwendeten Werkstoffen und Abmessungen wie auch auf der Erzeugnisform, d.h. nahtlose und geschweißte Ausführungen der Rohrleitungen. Neben einer Literaturrecherche, wie beispielsweise im Regelwerk des KTAs, wurde u.a. Kontakt mit EVUs und Firmen, die im nuklearen Rückbau tätig sind, aufgenommen. Ausgehend von den Rechercheergebnissen, wurden fünf verschiedene Werkstücke für die Versuchsdurchführung zur Rohrintrennung gewählt. Durch die vorangehende Recherche sollte die Nachbildung praxisnaher Werkstücke sichergestellt werden.

Auf Basis der Werkstücke wurden anschließend ein Scheibenfräser und drei verschiedene Kreissägeblätter zur Versuchsdurchführung ausgewählt. Es wurden verschiedene Schneidstoffe (HSS und VHM) wie auch Werkzeuge mit und ohne Werkzeugbeschichtung untersucht. Darüber hinaus wurde die Eignung von Trennscheiben mit drei verschiedenen Schleifmitteln – Keramik, Korund und Diamant – zur Rohrintrennung an unterschiedlichen Werkstücken analysiert und Betriebsparameter für die entsprechenden Werkzeuge identifiziert.

Die vorliegende Arbeit zeigt auf, dass in kerntechnischen Anlagen, in welchen i.d.R. Chrom-Nickel-Edelstähle verwendet werden, vorzugsweise Trennscheiben aus Keramik zur Trennung freiliegender Rohrleitungen eingesetzt werden sollten. Keramik-Trennscheiben erzielten einen guten Volumenabtrag bei einem geringeren Massenverlust und einer geringeren Temperaturentwicklung als Trennscheiben mit Schleifmittel Korund. Diamantbesetzte Trennscheiben

eignen sich vorzugweise für die Trennung einbetonierter Rohrleitungen. Im Vergleich zu Keramik erzielt Diamant einen gleichmäßigeren Schnitt über die gesamte Schnitttiefe. Je nach Wahl des Schleifmittels können mit Trennscheiben sowohl freiliegende als auch einbetonierte Leitungen von der Rohrinneenseite aus getrennt werden. In der flexibleren Anwendung für eine Vielzahl an Rohrleitungen liegt neben den günstigen Anschaffungskosten einer Trennscheibe ein wesentlicher Vorteil gegenüber der Rohrintrennung mittels Scheibenfräsern und Kreissägeblättern. Bei einem Kontakt mit Beton stumpfen diese Trennwerkzeuge ab.

Erfolgt die Rohrintrennung durch Scheibenfräser oder Kreissägeblätter sind Trennwerkzeuge aus Schnellarbeitsstahl mit Werkzeugbeschichtung zu wählen. Durch die Werkzeugbeschichtung erhöhen sich die Standzeit und die Schnittkräfte des Trennwerkzeuges, damit verbunden steigt der Volumenabtrag. In der vorliegenden Arbeit wurden jeweils konkrete Empfehlungen für die Betriebsparameter (Umfangs- und Vorschubgeschwindigkeit) ausgesprochen, die auf der Datenauswertung der generierten Daten am eigens entwickelten Versuchsstand zur Rohrintrennung basieren.

Unabhängig von den untersuchten Trennwerkzeugen konnte durch die Datenauswertung der Einfluss einer Längsschweißnaht auf die Rohrintrennung nachgewiesen werden. Zurückzuführen ist dies auf die Herstellungsart und damit auf die idealere Rundheit von nahtlosen Rohren gegenüber Rohrleitungen mit einer Längsschweißnaht. Relevant ist dies vorwiegend für Rohrleitungen, die beispielsweise aufgrund einer möglichen Kontaminationsverschleppung nur auf eine gewisse Restwanddicke getrennt werden können.

Die vorliegende Arbeit leistet damit einen Beitrag zur Wahl eines geeigneten Trennwerkzeuges für die Rohrintrennung und spricht Empfehlungen für die Betriebsparameterwahl je Trennwerkzeug aus. Die drei Forschungsfragen wurden durch die Entwicklung eines Versuchsstandes zur Rohrintrennung und die damit verbundene Versuchsdurchführung und -auswertung wissenschaftlich untersucht und beantwortet. Die Motivation für die Arbeit und die Eingangsparameter der Werkstücke wie Werkstoff und Durchmesser sind grundsätzlich auf den nuklearen Rückbau fokussiert. Die Ergebnisse können jedoch auch für die Rohrintrennung im konventionellen Bereich angewendet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Atomkraftwerke in Deutschland,“ 16.04.2023. [Online]. Available: <https://www.bmuv.de/themen/nukleare-sicherheit/aufsicht-ueber-atomkraftwerke/atomkraftwerke-in-deutschland>. [Zugriff am 17.05.2024].
- [2] Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, „Stilllegung und Rückbau,“ [Online]. Available: <https://www.grs.de/de/Forschung-und-Begutachtung/stilllegung-und-Rueckbau>. [Zugriff am 17.05.2024].
- [3] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, „Abgebaute Kernanlagen in Bayern,“ [Online]. Available: https://www.stmuv.bayern.de/themen/reaktorsicherheit/stilllegung_abbau/stillgelegte_abgebaute.htm. [Zugriff am 17.05.2024].
- [4] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, „FAQS zum Rückbau von Kernkraftwerken,“ [Online]. Available: https://www.stmuv.bayern.de/themen/reaktorsicherheit/stilllegung_abbau/faq.htm. [Zugriff am 04.09.2023].
- [5] W. Hackel, „Infoveranstaltung zum Abbau der Anlage Mülheim-Kärlich,“ RWE, 22.09.2012. [Online]. Available: <https://www.rwe.com/-/media/RWE/documents/01-derkonzern/betriebsstandorte/muellheizkraftwerk-muelheim-kaerlich/infoveranstaltung-zum-abbau-der-anlage-muelheim-kaerlich.pdf>. [Zugriff am 05.09.2023].
- [6] A. D. Little, „Anzahl der in den Rückbau gehenden Kernkraftwerke nach Regionen weltweit bis zum Jahr 2030,“ Handelsblatt, 28.09.2011. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/201684/umfrage/rueckbau-von-kernkraftwerken-weltweit/>. [Zugriff am 16.05.2024].
- [7] K. Schmid, „Elf EU-Staaten vereinbaren Nuklear-Allianz,“ ARD, 28.02.2023. [Online]. Available: <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/atomkraft-eu-101.html>. [Zugriff am 16.05.2024].
- [8] P. Laufs, Reaktorsicherheit für Leistungskernkraftwerke 2 - Die Entwicklung im politischen und technischen Umfeld der Bundesrepublik Deutschland, Stuttgart, Deutschland: Springer-Verlag GmbH, 2018, 2. Auflage.
- [9] M. Weber, Untersuchungen zum Abtrag von Wärmedämmverbundsystem mit spanender Bürste, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2021.
- [10] Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), „Fukushima am 11. März 2011: Der katastrophale Unfall und seine Folgen,“ 01.03.2024. [Online]. Available: https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/unfaelle/fukushima/fukushima_node.html. [Zugriff am 16.05.2024].
- [11] Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), „Der Atomausstieg in Deutschland,“ 21.01.2024. [Online]. Available: https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/ausstieg-atomkraft/ausstieg_node.html.

- [Zugriff am 16.05.2024].
- [12] Bundesministerium der Justiz, „Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz),“ 04.12.2022. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/atg/_7.html. [Zugriff am 17.05.2024].
- [13] Die Bundesregierung, „Energiewende - "Der Atomausstieg macht unser Land sicherer",“ 19.04.2023. [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/ausstieg-aus-der-kernkraft-2135796>. [Zugriff am 16.05.2024].
- [14] Die Bundesregierung, „Ausstieg aus der Kernkraft,“ [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/ausstieg-aus-der-kernkraft-394280>. [Zugriff am 11.04.2024].
- [15] Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH (JEN), „Rückbau,“ [Online]. Available: <https://www.jen-juelich.de/startseite/themen/rueckbau>. [Zugriff am 22.01.2024].
- [16] Vattenfall GmbH, „Kernenergie: Rückbau eines Kernkraftwerk - was bedeutet das?,“ [Online]. Available: <https://group.vattenfall.com/de/was-wir-tun/unsere-energiequellen/kernenergie/rueckbau-eines-kernkraftwerk>. [Zugriff am 22.01.2024].
- [17] Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), „Stilllegung kerntechnischer Anlagen,“ 01.11.2023. [Online]. Available: <https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/stillegung/stillegung/stillegung.html>. [Zugriff am 09.12.2023].
- [18] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV); im Auftrag Wild, „Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach §7 des Atomgesetzes,“ 16.09.2021. [Online]. Available: https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/rsh/3-bmub/3_73.pdf?__blob=publicationFile&v=1. [Zugriff am 10.09.2023].
- [19] V. Baldauf, „Herausforderung für Generationen, Rückbau von Kernkraftwerken,“ 08.09.2016. [Online]. Available: <https://www.tuev-nord.de/explore/de/entdeckt/rueckbau-von-kernkraftwerken/>. [Zugriff am 22.01.2024].
- [20] PreussenElektra GmbH, „Vom Reststoff zum Wertstoff: Das passiert mit Rückbaumaterial aus dem Kernkraftwerk Unterweser,“ [Online]. Available: https://www.preussenelektra.de/content/dam/revu-global/preussenelektra/documents/UnsereAufgabe/freigabe/PEL_Freigabeverfahren.pdf. [Zugriff am 11.09.2023].
- [21] Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), „Abfallarten und Entstehung,“ [Online]. Available: <https://www.bge.de/de/abfaelle/abfallarten-und-entstehung/>. [Zugriff am 22.01.2024].
- [22] C. Hecking, „Nukleares Erbe - Wie ein Atomkraftwerk zerlegt wird,“ SPIEGEL Wirtschaft, 03.01.2019. [Online]. Available: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/abriss-des-atomkraftwerks-muelheim-kaerlich-so-laeuft-der-atomausstieg-konkret-a-de01b7c1-9b28-4cf5-bf98-1f576f80ac49>. [Zugriff am 11.09.2023].

- [23] EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH, „Freigabe radioaktiver Stoffe und Herausgabe nicht radioaktiver Stoffe aus dem Abbau von Kernkraftwerken,“ 06.10.2022. [Online]. Available: https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/ESK_Informationspapier_Freigabe_Kurzfassung_ESK101_06.10.2022.pdf. [Zugriff am 11.09.2023].
- [24] EnBW Kernkraftwerk GmbH, „Verwertung und Beseitigung, Freigabe,“ Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 08.05.2020. [Online]. Available: <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/kernenergie-und-strahlenschutz/entsorgung/freigabe>. [Zugriff am 11.09.2023].
- [25] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, „Stilllegung kerntechnischer Anlagen,“ 2017. [Online]. Available: https://www.grs.de/sites/default/files/publications/grs_stillegung_web.pdf. [Zugriff am 26.10.2023].
- [26] Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), „Abfallarten,“ 23.07.2021. [Online]. Available: https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/abfaelle/arten/arten_node.html;jsessionid=88C853172901B1363F4F84034AD18A39.internet971. [Zugriff am 23.01.2024].
- [27] Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), „Abfallarten und ihre Entstehung,“ [Online]. Available: https://www.endlagersuche-infoplattform.de/webs/Endlagersuche/DE/Radioaktiver-Abfall/Abfallarten/abfallarten_artikel.html. [Zugriff am 22.01.2024].
- [28] Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), „Endlager Konrad,“ [Online]. Available: <https://www.bge.de/de/konrad/>. [Zugriff am 22.01.2024].
- [29] Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), „Akteur*innen und Aufgaben rund um das Endlager Konrad,“ [Online]. Available: <https://www.bge.de/de/konrad/kurzinformationen/akteure-und-aufgaben/>. [Zugriff am 23.01.2024].
- [30] Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), „Das Verfahren,“ [Online]. Available: <https://www.bge.de/de/endlagersuche/standortauswahlverfahren/>. [Zugriff am 22.01.2024].
- [31] Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ), „Unser Auftrag,“ [Online]. Available: <https://bgz.de/unser-auftrag/>. [Zugriff am 22.01.2024].
- [32] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, „Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt,“ 27.06.2014. [Online]. Available: <https://www.ad-2000-online.de/resource/blob/154288/0ffc71b6f32591c392181ed4a1dd7bc/rl-2014-68-eu-data.pdf>. [Zugriff am 20.09.2023].
- [33] G. Wossog, Handbuch Rohrleitungsbau Band I: Planung - Herstellung - Errichtung, Essen, Deutschland: Vulkan-Verlag GmbH, 2016, 4. Auflage.
- [34] PreussenElektra GmbH, „Kernkraftwerk Isar 2 - Stilllegung und Abbau, Kurzbeschreibung,“ 08/2021. [Online]. Available: https://www.stmuv.bayern.de/themen/reaktorsicherheit/stillegung_abbau/doc/kki2%

- 20kurzbeschreibung% 20sag% 202021_08_01.pdf. [Zugriff am 08.09.2023].
- [35] V. Andreas, „Der Rückbau des Kraftwerks in Neckarwestheim,“ 14.08.2019. [Online]. Available: <https://www.stimme.de/regional/region/der-rueckbau-des-kraftwerks-in-neckarwestheim-art-4236499>. [Zugriff am 14.09.2023].
- [36] Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), „Leichtwasserreaktoren,“ 18.04.2023. [Online]. Available: <https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/kta-uebersicht/lwr/leichtwasserreaktoren.html>. [Zugriff am 08.05.2024].
- [37] Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, „Druckwasserreaktor (DWR),“ [Online]. Available: <https://www.grs.de/de/glossar/druckwasserreaktor-dwr>. [Zugriff am 20.09.2023].
- [38] Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, „Siedewasserreaktor (SWR),“ [Online]. Available: <https://www.grs.de/de/glossar/siedewasserreaktor-swr>. [Zugriff am 08.05.2024].
- [39] SWR aktuell, „Umweltministerium gibt Kraftwerk trotz Schäden frei - Nach Sicherheitscheck in Neckarwestheim: Weiter Streit um Nutzung von Atomkraft,“ 05.07.2022. [Online]. Available: <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/heilbronn/revision-gkn-risse-neckarwestheim-atomkraftwerk-100.html>. [Zugriff am 10.10.2023].
- [40] F. Dwenger, Einfluss des Tragverhaltens von Dübelbefestigungen auf die Bauwerk-Komponenten-Wechselwirkungen bei Erdbebenbeanspruchung, Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart, Stuttgart, 2019.
- [41] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Regelwerk des Kerntechnischen Ausschusses,“ 07.06.2023. [Online]. Available: <https://www.bmuv.de/themen/nukleare-sicherheit/rechtsvorschriften/-technische-regeln/kta-regelwerk>. [Zugriff am 10.10.2023].
- [42] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 6708 Rohrleitungsteile, Definition und Auswahl von DN (Nennweite),“ Beuth Verlag GbmH, 10772 Berlin, 1995.
- [43] HT CONNECT GmbH & Co. KG, „PE Rohr Druckrohr 32 x 3,0mm DVGW Rollen- und Stangenware,“ HT CONNECT GmbH & Co. KG, [Online]. Available: <https://www.pvc-welt.de/Impressum>. [Zugriff am 16.05.2024].
- [44] Ganter Norm, „GN 990 Konstruktionsrohre,“ [Online]. Available: <https://www.ganternorm.com/de/produkte/3.7-Verbinden-Aufbauen-mit-Klemm-und-Verbindungselementen/Rohre-Stangen/GN-990-Konstruktionsrohre-Edelstahl>. [Zugriff am 20.05.2024].
- [45] Kerntechnischer Ausschuss (KTA), „KTA 2502: Mechanische Auslegung von Brennelementlagerbecken in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren,“ 11/2011. [Online]. Available: https://www.kta-gs.de/d/regeln/2500/2502_r_2011_11.pdf. [Zugriff am 11.10.2023].
- [46] Kerntechnischer Ausschuss (KTA), „KTA 3201.1: Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen,“ 11/2017. [Online]. Available: <https://www.kta->

- gs.de/d/regeln/3200/3201_1_r_2017_11_ber.pdf. [Zugriff am 17.10.2023].
- [47] Kerntechnischer Ausschuss (KTA), „KTA 3204: Reaktordruckbehälter-Einbauten,“ 11/2017. [Online]. Available: https://www.kta-gs.de/d/regeln/3200/3204_r_2017_11.pdf. [Zugriff am 10.10.2023].
- [48] Kerntechnischer Ausschuss (KTA), „KTA 3205.1: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen – Teil 1: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen für Primärkreis Komponenten in Leichtwasserreaktoren,“ 11/2022. [Online]. Available: https://www.kta-gs.de/d/regeln/3200/3205_1_r_2018_10.pdf. [Zugriff am 17.10.2023].
- [49] Kerntechnischer Ausschuss (KTA), „KTA 3205.2 Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen; Teil 2: Komponentenstützkonstruktionen mit nichtintegralen Anschlüssen für druck- und aktivitätsführende Komponenten in Systemen außerhalb des Primärkreises,“ 10/2018. [Online]. Available: https://www.kta-gs.de/d/regeln/3200/3205_2_r_2018_10_ber.pdf. [Zugriff am 11.10.2023].
- [50] Kerntechnischer Ausschuss (KTA), „Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises; Teil 1: Werkstoffe,“ 11/2017. [Online]. Available: https://www.kta-gs.de/d/regeln/3200/3211_1_r_2017_11_ber.pdf. [Zugriff am 11.10.2023].
- [51] Bundesverband deutscher Stahlhandel (BDS AG), „Rohrherstellung,“ [Online]. Available: <https://kerschgens.stahl-lexikon.de/r/2332-rohrherstellung.html>. [Zugriff am 14.10.2023].
- [52] K.H. Brensing, B. Sommer, „Herstellverfahren für Stahlrohre,“ 10/2019. [Online]. Available: https://www.wv-stahlrohre.de/wp-content/uploads/2019/10/Stahlrohre_Herstellverfahren.pdf. [Zugriff am 31.01.2024].
- [53] Overhage Röhren- und Stahlhandel GmbH & Co. KG, „Wissenwertes zum Thema Stahlrohre - Herstellungsverfahren,“ [Online]. Available: <https://rundrohre-online.de.webnode.page/wissenwertes/herstellungsverfahren/>. [Zugriff am 31.01.2024].
- [54] Salzgitter AG, „Wie funktioniert das Mannesmann-Verfahren zum Walzen nahtloser Stahlrohre?,“ [Online]. Available: <https://geschichte.salzgitter-ag.com/de/faq/wie-funktioniert-das-mannesmann-verfahren-zum-walzen-nahtloser-stahlrohre.html>. [Zugriff am 14.10.2023].
- [55] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 8580 Fertigungsverfahren Begriffe, Einteilung,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2022-12.
- [56] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 8589-0 Fertigungsverfahren Spanen Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2003-09.
- [57] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 8589-3 Fertigungsverfahren Spanen Teil 3: Fräsen; Einteilung, Unterteilung, Begriffe,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2003-09.
- [58] Deutsches Instiut für Normung e.V., „DIN 8589-6 Fertigungsverfahren Spanen Teil 6: Sägen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin,

2003-09.

- [59] Deutsches Instiut für Normung e.V., „DIN 8589-11 Fertigungsverfahren Spanen Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug; Einordnung, Unterteilung, Begriffe,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2003-09.
- [60] DWT GmbH, „Edelstahlrohre schneiden,“ DWT GmbH, [Online]. Available: <https://www.dwt-gmbh.de/rohrbearbeitung/rohre-schneiden/exact-rohrsaeagen/edelstahlrohre-schneiden/>. [Zugriff am 19.09.2023].
- [61] DWT GmbH, „Edelstahlrohrsäge Exact Inox 220,“ DWT GmbH, [Online]. Available: <https://www.dwt-gmbh.de/rohrbearbeitung/rohre-schneiden/exact-rohrsaeagen/edelstahlrohre-schneiden/edelstahlrohrsaeage-exact-inox-220/>. [Zugriff am 19.09.2023].
- [62] DWT GmbH, „Exact Rohrsäge Pro Series 360,“ DWT GmbH, [Online]. Available: <https://www.dwt-gmbh.de/rohrbearbeitung/rohre-schneiden/exact-rohrsaeagen/stahlrohre-schneiden/exact-pro-series-360/>. [Zugriff am 19.09.2023].
- [63] DWT GmbH, „Stahlrohrpfähle trennen,“ DWT GmbH, [Online]. Available: <https://www.dwt-gmbh.de/rohrbearbeitung/rohre-schneiden/exact-rohrsaeagen/stahlrohrpfahle-trennen/>. [Zugriff am 19.09.2023].
- [64] DWT GmbH, „Rohrtrennmaschine Exact Infinity,“ DWT GmbH, [Online]. Available: <https://www.dwt-gmbh.de/userfiles/file/rohrbearbeitung/rohre-schneiden/rohtrennmaschine/rohtrennmaschine-exact-infinty.pdf>. [Zugriff am 18.09.2023].
- [65] AIXXAIR - S.F.E Group, „Innovative orbital solutions,“ [Online]. Available: <https://www.axxair.com/dunnwandige-rohre/cc172>. [Zugriff am 20.09.2023].
- [66] F. Wabnitz, Analyse zum Stand der Technik von spanenden Trennwerkzeugen zur Bearbeitung (kontaminierter) Rohrleitungen, Karlsruher Instiut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2020.
- [67] F. Plaumann, „Was ist ein Winkelschleifer?,“ Werkzeug-Insider , [Online]. Available: <https://werkzeug-insider.de/einsteigerwissen/was-ist-ein-winkelschleifer/>. [Zugriff am 18.09.2023].
- [68] Klingspor AG, „Winkelschleifer,“ [Online]. Available: <https://www.klingspor.de/schleifwissen/winkelschleifer>. [Zugriff am 18.09.2023].
- [69] DWT GmbH, „Anwendungsvergleich DLW vs. Winkelschleifer,“ [Online]. Available: <https://www.dwt-gmbh.de/rohrbearbeitung/rohre-schneiden/rohtrenn-und-anfasmachines/typ-dlw/>. [Zugriff am 19.09.2023].
- [70] R. Borchert, „Stilllegung und Rückbau von Kernkraftwerken in Deutschland,“ 07.08. 2020. [Online]. Available: <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/icomoshefte/issue/view/5219>. [Zugriff am 12.09.2023].
- [71] Orano GmbH, *schriftlicher Austausch mit einem Mitarbeitenden der Orano GmbH*, 2023.
- [72] EnBW Kernkraft GmbH, „Stilllegung und Abbau von Anlagenteilen des Kernkraftwerks Neckarwestheim Block II (GKN II),“ 05/2018. [Online]. Available: <https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m->

- um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Kernenergie/Genehmigungsverfahren/GKN/GKN_2/1805_Kurzbeschreibung_SAG_GKNII.pdf. [Zugriff am 23.10.2023].
- [73] TRAWEMA GmbH, *schriftlicher Austausch mit einem Mitarbeitenden der TRAWEMA GmbH*, 2023.
- [74] Kübler Rohrtrenntechnik GmbH, „Rohre trennen von Innen nach Aussen im Stollen,“ [Online]. Available: <https://roehrtrenntechnik.ch/10-bildergalerie-rohre-trennen-von-innen-nach-aussen-im-stollen/>. [Zugriff am 12.09.2023].
- [75] K. Siebertz, D. van Bebber, T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE)*, Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2. Auflage 2017.
- [76] src-werkzeuge e.K., „Scheibenfräser,“ [Online]. Available: <https://www.src-werkzeuge.de/produkte/fraesen/traegerwerkzeuge/scheibenfraeser/>. [Zugriff am 23.09.2023].
- [77] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 1834 Teil 1: Schmale Scheibenfräser - Maße,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 1986-01.
- [78] gwtr.de, „Fräserkunde - Scheibenfräser,“ 11/2018. [Online]. Available: <http://gtwr.de/div/webold/german/fachartikel/fraeserkunde/index.html>. [Zugriff am 26.09.2023].
- [79] Hoffmann Group, „Datenblatt: Schmäler Scheibenfräser, unbeschichtet, $\varnothing \times$ Breite js16 \times k11: 125X3mm,“ 17.10.2022. [Online]. Available: https://cdn.hoffmann-group.com/dsh/de-DE/dsh_de-de_25446.pdf. [Zugriff am 23.09.2023].
- [80] Contorion GmbH, „Kreissägeblatt: Welches ist das richtige?,“ 01.05.2021. [Online]. Available: <https://www.contorion.de/ratgeber/kreissaegeblatt-ratgeber>. [Zugriff am 24.12.2023].
- [81] A. Hirsch, *Werkzeugmaschinen-Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012, 2. Auflage.
- [82] F. Klocke, *Fertigungsverfahren 1 Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*, Deutschland: Springer-Verlag GmbH, 2018 9. Auflage.
- [83] B. Denkena, H. K. Tönshoff, *Spanen Grundlagen*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, 3. bearbeitete und erweiterte Auflage.
- [84] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 4957 Werkzeugstähle,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2018-11.
- [85] Stahl Industry & Trading, „VHM oder HSS/E Werkzeuge wählen?,“ [Online]. Available: <https://www.stahl-industry.de/info/vhm-oder-hss-e.html>. [Zugriff am 15.09.2023].
- [86] Corintian Diamonds Tools GmbH, „VHM, HSS, AlTiN - Welches Werkzeugmaterial ist das beste?,“ [Online]. Available: <https://corintian-diamondtools.de/welches-werkzeugmaterial/>. [Zugriff am 27.09.2023].
- [87] A. R. Jochen Dietrich, *Praxis der Zerspantechnik - Verfahren, Prozesse, Werkzeuge*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020, 13. überarbeitete und ergänzte Auflage.
- [88] RUKO GmbH Präzisionswerkzeuge, „TiAlN: Die Titan-Aluminium-Nitrit-Beschichtung,“ [Online]. Available: <https://ruko.de/de/wissen/know-how/tialn-die->

- titan-aluminium-nitrit-beschichtung. [Zugriff am 15.09.2023].
- [89] B. Lippold, „Beschichten,“ LUMITOS AG, [Online]. Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Beschichten.html>. [Zugriff am 28.09.2023].
- [90] Stahlhandel Gröditz GmbH, „1.4541 (X6CrNiTi18-10) Datenblatt,“ [Online]. Available: <https://www.stahlportal.com/lagervorrat/14541-x6crniti18-10/>. [Zugriff am 01.10.2023].
- [91] August Rüggeberg GmbH & Co. KG, „PFERD-Wissen und Werkzeuge rund um Edelstahl (INOX),“ 08/2019. [Online]. Available: <https://www.pferd.com/media/praxis-inox-2019-web-de.pdf>. [Zugriff am 20.10.2023].
- [92] Hoffmann Group, „Datenblatt: Metallkreissägeblatt fein, unbeschichtet, \varnothing ×Stärke: 125X3mm,“ 09.01.2023. [Online]. Available: https://cdn.hoffmann-group.com/dsh/de-DE/dsh_de-de_17238.pdf. [Zugriff am 18.09.2023].
- [93] Hoffmann Group [1], „Datenblatt: Kreissägeblatt, TiAlN, \varnothing ×Stärke: 125X2mm,“ 22.07.2022. [Online]. Available: https://cdn.hoffmann-group.com/dsh/de-DE/dsh_de-de_667628.pdf. [Zugriff am 18.09.2023].
- [94] Hoffmann Group [2], „Datenblatt: Kreissägeblatt, TiAlN., \varnothing ×Stärke: 125X2mm,“ 22.07.2022. [Online]. Available: https://cdn.hoffmann-group.com/dsh/de-DE/dsh_de-de_667627.pdf. [Zugriff am 18.09.2023].
- [95] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN 12413 Sicherheitsanforderungen für Schleifwerkzeuge aus gebundenem Schleifmittel,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2019-12.
- [96] August Rüggeberg GmbH & Co. KG, PFERD Werkzeuge, „PFERD Downloads: Werkzeughandbuch 23 (Deutschland),“ 04/2022. [Online]. Available: <https://de.pferd.com/de/service/downloads/>. [Zugriff am 04.10.2023].
- [97] BEUTTER Präzisions-Komponenten GmbH & Co. KG, „Technische Keramik schleifen – Schleifbearbeitung von Keramikbauteilen,“ [Online]. Available: <https://www.beutter.de/de/magazin/technische-keramik-schleifen>. [Zugriff am 10.10.2023].
- [98] Metabowerke GmbH, „metabo PROFESSIONAL POWER TOOL SOLUTIONS - Zubehörprogramm,“ 05/2021. [Online]. Available: https://www.metabo.com/t3/fileadmin/metabo/de/070_aktuell/02_kataloge_logos/2021_Zubehoerkatalog.pdf. [Zugriff am 03.10.2023].
- [99] Saint-Gobain Abrasives GmbH; Saint-Gobain Diamantwerkzeuge GmbH, „Die Technologie hinter Trenn- und Schrupscheiben,“ 17.01.2020. [Online]. Available: <https://www.nortonabrasives.com/de-de/downloads/technische-informationen/anwendungen/was-verstehen-wir-unter-trenn-und-schrupscheiben>. [Zugriff am 04.10.2023].
- [100] Metabowerke GmbH, „metabo PROFESSIONAL POWER TOOL SOLUTIONS - Zubehörprogramm,“ 05/2021. [Online]. Available: https://www.metabo.com/t3/fileadmin/metabo/de/070_aktuell/02_kataloge_logos/2021_Zubehoerkatalog.pdf. [Zugriff am 03.10.2023].

- [101] RHODIUS, „RHODIUS ABRASIVE LINE,“ [Online]. Available: <https://hk-sol.com/HK%20DATA/2016%20Catalog.pdf>. [Zugriff am 17.05.2024].
- [102] Osborn GmbH, „Produktkatalog 2020/21,“ [Online]. Available: https://www.toolteam24.com/de-DE/downloads/dl/file/id/659/Osborn_Hauptkatalog_Oberflaechenbehandlung_Buers ten.pdf. [Zugriff am 25.09.2023].
- [103] Hoffmann Group, „Datenblatt: Diamant-Trennscheibe STANDARD**Universal, Scheiben-ø: 125 mm,“ 29.04.2022. [Online]. Available: https://cdn.hoffmann-group.com/dsh/de-DE/dsh_de-de_2578221.pdf. [Zugriff am 22.09.2023].
- [104] Hoffmann Group, „Datenblatt: CerRapid Trennscheibe EXTRA SCHMAL, Stahl, INOX, Scheiben-ø: 125mm,“ 22.03.2023. [Online]. Available: https://cdn.hoffmann-group.com/dsh/de-DE/dsh_de-de_1078251.pdf. [Zugriff am 15.09.2023].
- [105] Hoffmann Group, „Datenblatt: Trennscheibe, Hochleistungsausführung X-LOCK EXTRA SCHMAL, INOX,“ 28.04.2023. [Online]. Available: https://cdn.hoffmann-group.com/dsh/de-DE/dsh_de-de_1071771.pdf. [Zugriff am 05.09.2023].
- [106] HIT Honer Industrietechnik, „Trennscheiben für die Stahlbearbeitung,“ [Online]. Available: https://www.hit-honer.de/direkt_1/schleifmittel/trenn/stahl.html. [Zugriff am 01.10.2023].
- [107] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN 12413: Sicherheitsanforderungen für Schleifwerkzeuge aus gebundenem Schleifmittel,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2019.
- [108] vgbe energy e.V., „Der Verband- Organisation und Struktur,“ [Online]. Available: <https://www.vgbe.energy/der-verband/>. [Zugriff am 11.10.2023].
- [109] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 1088 Nichtrostende Stähle Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 20220-01.
- [110] ROSTFREI-STAHL Geisweid GmbH, „Werkstoff-Nr.: 1.4541,“ [Online]. Available: <https://www.rostfrei-stahl.com/info-center/werkstoffdatenblaetter/14541/>. [Zugriff am 13.10.2023].
- [111] Würth Industries Service GmbH & Co. KG, „Austenitische Stähle,“ [Online]. Available: https://www.wuerth-industrie.com/web/de/wuerthindustrie/technikportal/edelstahl/austenitische_staehle/a ustenitischerstahl.php. [Zugriff am 13.10.2023].
- [112] Salzgitter Flachstahl GmbH, „P235GH Warmfeste Druckbehälterstähle,“ 09/2011. [Online]. Available: https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktinformationen/wa rmgewalzte_produkte/deu/P235GH.pdf. [Zugriff am 23.10.2023].
- [113] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN 10028-2: Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen Teil 2: Unlegierte und legierte Stähle mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2017-10.

- [114] GSI mbH, „Mit den neuen Werkstoffbezeichnungen nach der DIN EN,“ 03/2012. [Online]. Available: https://www.slv-duisburg.de/fileadmin/gsi_duisburg/Allgemeine_PDFs/Werkstoffbezeichnungen_auf_DU.pdf. [Zugriff am 23.10.2023].
- [115] Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V., „Zement Merkblätter: B10 - Schwerbeton/Strahlenschutzbeton,“ 01.02.2010. [Online]. Available: <https://zertplus.baustoff-ueberwachung.de/service/zement-merkblaetter/>. [Zugriff am 23.10.2023].
- [116] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 1045-4: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 4: Betonfertigteile - Allgemeine Regeln,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2023-08.
- [117] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 6580: Begriffe der Zerspantechnik - Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 1985-10.
- [118] August Rüggeberg GmbH & Co. KG, PFERD Werkzeuge, „PFERD Drehzahlrechner,“ [Online]. Available: <https://de.pferd.com/de/service/drehzahlrechner#antriebsdrehzahl>. [Zugriff am 16.10.2023].
- [119] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), „Glossar - Frequenz,“ [Online]. Available: https://www.bfs.de/DE/service/glossar/_functions/glossar.html?cms_lv2=6028364&cms_lv3=6028004. [Zugriff am 09.10.2023].
- [120] R. Fischer, Elektrotechnik für Maschinenbauer sowie Studierende technischer Fächer, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019, 16. überarbeitete und neu gestaltete Auflage.
- [121] Extech Instruments Corporation, „Bedienungsanleitung Modell RPM10 - Kombiniertes Laser-Fototachometer zur Kontaktmessung mit eingebautem IR-Thermometer,“ 08/2007. [Online]. Available: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/de/000121637ML02/bedienungsanleitung-121637-extech-rpm10-drehzahlmesser-mechanisch-optisch-05-19999-umin-10-99999-umin.pdf>. [Zugriff am 15.09.2023].
- [122] Conrad Electronic SE, „Extech RPM10 Drehzahlmesser mechanisch, optisch 0.5 - 19999 U/min 10 - 99999 U/min,“ [Online]. Available: https://www.conrad.de/de/p/extech-rpm10-drehzahlmesser-mechanisch-optisch-0-5-19999-u-min-10-99999-u-min-121637.html?hk=SEM&WT.mc_id=google_pla&gclid=EAIAIQobChMI4pyRIYrmgQMVy4VoCR0tKg26EAQYASABEgJsHPD_BwE#productDescription. [Zugriff am 15.09.2023].
- [123] C. & E. Fein GmbH, „GSZ 8-280 PE Geradschleifer 28 000/min,“ [Online]. Available: https://fein.com/de_de/maschinen/schleifen-polieren/geradschleifer/gsz-8-280-pe-72231760000/. [Zugriff am 03.03.2023].
- [124] ME-Meßsysteme GmbH, „Mehrkomponenten-Sensor K6D /F6D /K3R Bedienungsanleitung,“ 14.03.2023. [Online]. Available: <https://www.me-systeme.de/shop/de/sensoren/kraftsensoren/k6d/k6d1108>. [Zugriff am 07.09.2023].
- [125] ME-Meßsysteme GmbH, „K6D: 6-Achsen Kraft-Momenten Sensor,“ [Online]. Available: <https://www.me->

- systeme.de/shop/de/sensoren/kraftsensoren/k6d/k6d1102. [Zugriff am 07.09.2023].
- [126] Micro Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, „Betriebsanleitung scanCONTROL 29xx,“ [Online]. Available: <https://www.micro-epsilon.de/download/manuals/man--scanCONTROL-29xx--de.pdf>. [Zugriff am 14.10.2023].
- [127] J. Metzger, Entwicklung eines Verfahrens zur automatisierten Analyse eines Betonabtrages sowie dessen Volumendifferenz mittels Laserscan, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2021.
- [128] Festo Vertrieb GmbH & Co. KG, „Wegmesssysteme,“ [Online]. Available: https://www.festo.com/de/de/c/produkte/fabrikautomation/antriebe-aktuatoren/servopneumatische-positioniersysteme/wegmesssysteme-id_pim231/?page=0. [Zugriff am 26.10.2023].
- [129] E. Paucksch, S. Holsten, M. Linß, F. Tikal, Zerspantechnik Prozesse, Werkzeuge, Technologien, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2008, 12. Auflage.
- [130] Mettler-Toledo AG, Laboratory & Weighing Technologies, „Bedienungsanleitung Excellence Präzisionswaagen XS Modelle-Teil 1,“ [Online]. Available: https://www.mt.com/dam/product_organizations/laboratory_weighing/WEIGHING_SOLUTIONS/PRODUCTS/XS/MANUALS/de/XS-Precision_OI_de_11781087B.pdf. [Zugriff am 17.12.2023].
- [131] Testo SE & Co. KGaA, „Datenblatt testo 872s,“ 04 2022. [Online]. Available: <https://static-int.testo.com/media/41/30/ddec2c76ea71/testo-872s-Datasheet-1980-4124.pdf>. [Zugriff am 15.10.2023].
- [132] Mettler-Toledo GmbH, „Balance XS603S,“ [Online]. Available: https://www.mt.com/de/de/home/phased_out_products/Laboratory_Weighing_Solutions/Precision_Balances/Excellence/XS_Precision_Balances/XS_603_S.html. [Zugriff am 17.12.2023].
- [133] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), „Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 900: Arbeitsplatzgrenzwerte,“ 12.06.2023. [Online]. Available: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRGS/TRGS-900.html?templateQueryStringExpert=TRGS%20900>. [Zugriff am 29.10.2023].
- [134] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), „Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 561: Tätigkeiten mit krebserzeugenden Metallen und ihren Verbindungen,“ 14.06.2021. [Online]. Available: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRGS/TRGS-561.html?templateQueryStringExpert=TRGS%20561>. [Zugriff am 30.10.2023].
- [135] CASELLA CEL Inc., „CEL-712 Echtzeit-Staubmonitor, HB4048-01 Benutzerhandbuch,“ [Online]. Available: https://www.airflow.de/wp-content/uploads/2021/03/ANL_Microdust-Pro-CEL-712-deutsch.pdf. [Zugriff am 15.10.2023].
- [136] CASELLA CEL Inc., „TUFF Personenbezogene Probenahmepumpe,“ [Online]. Available: <https://pdf.directindustry.de/pdf/casella/tuff-pump/31897-445714.html>. [Zugriff am 14.10.2023].
- [137] C. Duller, Einführung in die Statistik mit EXCEL und SPSS - Ein anwendungsorientiertes Lehr- und Arbeitsbuch, Deutschland: Springer-Verlag

- GmbH , 2019, 4. überarbeitete und erweiterte Auflage.
- [138] J. Lüken, H. Schimmelpfennig, „Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression,“ Instiut für angewandte Datenanalyse GmbH (IfaD), 03/2020. [Online]. Available: <https://www.ifad.de/das-bestimmtheitsmass-der-linearen-regression/>. [Zugriff am 05.11.2023].
- [139] S. Lange, R. Bender, „Lineare Regression und Korrelation - Artikel Nr. 5 der Statistik-Serie in der DMW -,“ 2007. [Online]. Available: <https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/pdf/10.1055/s-2007-959028.pdf>. [Zugriff am 11.12.2023].
- [140] DATAtab, „Pearson Korrelation,“ [Online]. Available: <https://datatab.de/tutorial/pearson-korrelation>. [Zugriff am 11.12.2023].
- [141] L. Eichhorn, B. Horneffer, „Mittelwerte und Durchschnitte - Arithmetisches Mittel,“ Statisitsche Ämter des Bundes und der Länder, [Online]. Available: https://service.destatis.de/eLearning/modul14/lm_pg_796.html. [Zugriff am 11.12.2023].
- [142] N. Gabor, Untersuchungen zur Staubentwicklung bei der maschinellen Rückholung tiefengelagerter Abfallgebände, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2019.
- [143] Hoffmann Group, „GARANT Hochleistungsschrupp- und Trennscheiben,“ [Online]. Available: <https://www.hoffmann-group.com/DE/de/hom/anwendungsbereiche/schleif-und-trenntechnik/garant-cerrapid/e/119569/>. [Zugriff am 20.11.2023].
- [144] DATAtab, „Streuungsmaße,“ [Online]. Available: <https://datatab.de/tutorial/standardabweichung-varianz-spannweite>. [Zugriff am 07.03.2024].
- [145] S. Gentes, M. Bachmann, M. Pfau, C. Krau, C. Wadewitz, B. Manneck, „Teil I + II: Kurzbericht und Eingehende Darstellung zum Verbundvorhaben "Entwicklung eines neuartigen Rohrintrenners für die Demontage (kontaminierter) Rohrleitungen (RoTre)",“ 11/2023. [Online]. Available: https://www.tib.eu/de/suchen?tx_tibsearch_search%5Baction%5D=download&tx_tibsearch_search%5Bcontroller%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1883424372&cHash=e13fef1fc343a862b955f4977f06432f#download-mark. [Zugriff am 17.03.2024].
- [146] Hoffmann Group, „Datenblatt: VHM-Scheibenfräser HPC, TiAlN, \emptyset ×Breite $\pm 0,1 \times k11: 100X4$ mm,“ 24.02.2021. [Online]. Available: https://cdn.hoffmann-group.com/dsh/de-DE/dsh_de-de_25136.pdf. [Zugriff am 21.09.2023].
- [147] Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, „Reaktordruckbehälter,“ [Online]. Available: <https://www.grs.de/de/glossar/reaktordruckbehaelter>. [Zugriff am 10.10.2023].
- [148] H.-J. Bargel, Werkstoffkunde Strukturen - grundlegende Eigenschaften, Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland , 2022, 13. Auflage.
- [149] BERGER BETON GmbH, „Festlegung für Beton nach Eigenschaften,“ [Online]. Available: <https://bergerholding.eu/sites/default/files/upload/dokumente/preislisten/download/fe>

- stlegung_fuer_beton_nach_eigenschaften.pdf. [Zugriff am 23.10.2023].
- [150] Bundesministerium des Inneren und für Heimat (BMI), Bundesverwaltungsamt (BVA), „6.3.2 Ursache-Wirkungs-Diagramm,“ [Online]. Available: https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/Organisationshandbuch/6_MethodenTechniken/63_Analysetechniken/632_Ursache-Wirkungs-Diagramm/ursache-wirkungs-diagramm-node.html. [Zugriff am 28.10.2023].
- [151] Testo SE & Co. KGaA, „Emission, Reflexion, Transmission,“ [Online]. Available: https://www.testo.com/de-AT/Emission%2C+Reflexion%2C+Transmission/service_ggt_ti_emission. [Zugriff am 20.11.2023].
- [152] Statista GmbH, „Definition Median,“ [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/85/median/>. [Zugriff am 12.12.2023].
- [153] Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), „Basiswissen Radioaktivität,“ 19.02.2020. [Online]. Available: https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/abfaelle/basiswissen_radioaktivitaet/basiswissen_node.html. [Zugriff am 22.01.2024].
- [154] E. Roos, K. Maile, M. Seidenfuß, Werkstoffkunde für Ingenieure - Grundlagen, Anwendung, Prüfung, Deutschland: Springer-Verlag GmbH, 2022, 7. Auflage.
- [155] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 4545-1: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Knoop Teil 1: Prüfverfahren (ISO 4545-1:2023); Deutsche Fassung EN ISO 4545-1:2023,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2024-01.
- [156] B. Lang, Experimentelle Untersuchungen zur Optimierung der Prozessparameter bei der Rohrintrennung mittels Schleifscheiben, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2022.

Anhang

A: Versuchsreihen Trennscheiben

A-1: Ergänzende Ausführungen zur Analyse der Schnittkräfte durch 6-Achsen-Kraft-Momentensensor

A-1.1: Genauigkeit Methodik Schnittkraft

A-2: Versuchsreihe 1 und 3: Einfluss größerer Rohraußendurchmesser auf die Rohrrinnen-trennung am Beispiel von TS1 (CER)

A-3: Versuchsplan Vorversuche/Versuchsreihe 1-5 mit TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D)

B: Versuchsreihen Scheibenfräser und Kreissägeblätter

B-1: Ergänzende Ausführungen zur Analyse der Schnittkräfte durch 6-Achsen-Kraft-Momentensensor

B-1.2: Genauigkeit Methodik Schnittkraft

B-2: Vergleich Versuchsreihe 1, 2 und 4 am Beispiel von KSB1 (HSS)

B-3: Versuchsreihe 1 und 3: Einfluss größerer Rohraußendurchmesser auf die Rohrrinnen-trennung am Beispiel von KSB1 (HSS)

B-4: Versuchsplan Vorversuche/Versuchsreihe 1-5 mit SF1 (HSS), KSB1 (HSS), KSB2 (HSS, TiAlN) und KSB3 (VHM, TiAlN)

C: Detailinformationen Prototyp

A: Versuchsreihen Trennscheiben

A-1: Ergänzende Ausführungen zur Analyse der Schnittkräfte durch 6-Achsen-Kraft-Momentensensor

Im Folgenden wird erläutert, dass der Hebelarm von der Kraftmessdose, welche sich unter dem Antriebsmotor der Trennwerkzeuge befindet, auf die gemessenen Kräften in x-, y- und z-Richtung am Schneidkopf, keinen Einfluss hat. Folglich können die durch die Kraftmessdose aufgezeichneten Kräfte direkt ausgewertet werden. Zur besseren Veranschaulichung ist der 6-Achsen-Kraft-Momentensensor unter dem Synchronmotor der Trennscheiben in Abbildung A-1.1 zu sehen. Hierin ist u.a. der Hebelarm des Kraft-Momentensensors zum Schneidkopf in y-Richtung (204,5 mm) eingezeichnet. Der Schwerpunkt des Synchronmotors für Trennscheiben befindet sich in der Mitte der Kraftmessdose.

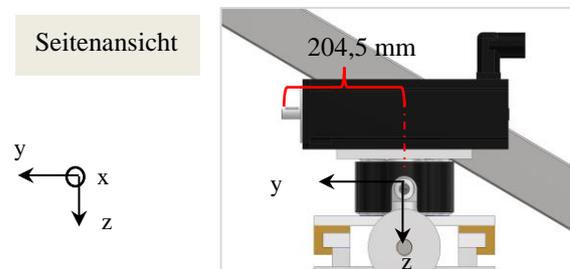


Abbildung A-1.1: Position 6-Achsen-Kraft-Momentensensor unter Synchronmotor für Antrieb Trennscheiben

Das System lässt sich in y- und z-Richtung wie folgt vereinfachen:

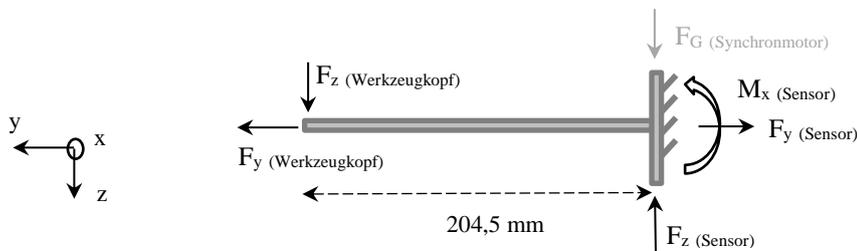


Abbildung A-1.2: Vereinfachte Darstellung der Schnittgrößen für Trennscheiben in y- und z-Richtung

Aus Abbildung A-1.2 ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht in y-Richtung folgender Zusammenhang (2.1):

$$0 = F_y \text{ Werkzeugkopf} - F_y \text{ (Sensor)} \quad (2.1)$$

$$F_y \text{ (Werkzeugkopf)} = F_y \text{ (Sensor)}$$

Damit ist nachgewiesen, dass die durch den 6-Achsen-Kraft-Momentensensor aufgezeichnete Kraft in y-Richtung ($F_y \text{ (Sensor)}$) der wirkenden Kraft in y-Richtung am Werkzeugkopf ($F_y \text{ (Werkzeug-}$

_{kopf}) entspricht. Die Erklärung für die Schnittkraft in x-Richtung ist identisch und wird daher nicht separat erläutert.³²

In z-Richtung wirkt vorwiegend die Gewichtskraft F_G des Antriebmotors für Trennscheiben (Synchronmotor, vgl. Abbildung 4.21). Dessen Gewichtskraft in der Einheit Newton [N] ergibt sich aus der Masse des Synchronmotors [kg] und der Erdbeschleunigung g [m/s²] aus (2.2) zu:

$$F_G = m * g \quad (2.2)$$

$$F_{G(\text{Synchronmotor})} = 4,1 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 40,22 \text{ N}$$

Durch die Kalibrierung des 6-Achsen-Kraft-Momentensensors vor jeder Versuchsdurchführung, wirkt die Gewichtskraft des Synchronmotors nicht in die aufgezeichneten Kräfte und Momente des Sensors mit ein. Die Gewichtskraft $F_{G(\text{Synchronmotor})}$ wird daher im nachfolgenden Kräftegleichgewicht nicht angesetzt. Ansonsten müsste in der Kraft $F_{z(\text{Sensor})}$ der Anteil der Gewichtskraft wieder mit eingerechnet werden. Somit ergibt sich folgendes Kräftegleichgewicht in z-Richtung:

$$0 = F_{z(\text{Werkzeugkopf})} - F_{z(\text{Sensor})}$$

$$F_{z(\text{Werkzeugkopf})} = F_{z(\text{Sensor})}$$

Damit ist nachgewiesen, dass die durch den 6-Achsen-Kraft-Momentensensor aufgezeichnete Kraft in z-Richtung ($F_{z(\text{Sensor})}$) der wirkenden Kraft in z-Richtung am Werkzeugkopf ($F_{z(\text{Werkzeugkopf})}$) entspricht.

A-1.1: Genauigkeit Methodik Schnittkraft

Die Ergebnisse der einzelnen Zielgrößen innerhalb der Datenauswertung zeigen, dass die generierten Daten untereinander konform sind. Nachfolgend wird zusätzlich anhand der Vorversuche und Versuchsreihe 1, welche jeweils die identischen Eingangsgrößen haben, die Standardabweichung σ für die aufgezeichneten Schnittkräfte (Mittelwert und Maximum) berechnet. Die Standardabweichung berechnet sich, wie in Absatz 5.2.3 erläutert, nach (2.0):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.0)$$

In Tabelle A-1.1 ist die Standardabweichung bei zwei Versuchswiederholungen über die untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten von TS1 (CER) an Werkstück 1 aufgeführt. Für die Vorschubgeschwindigkeit V_{f4} beträgt die Standardabweichung von F_x (Mittelwert) beispielsweise nur 0,48 N. Die Standardabweichung von F_x (Mittelwert) über die sechs Vorschubgeschwindigkeiten hinweg liegt zwischen 0,48 N und 2,00 N. Dies entspricht einer kleinen Streubreite. Die Standardabweichungen von F_x (Max.) sind dahingegen etwas größeren Schwankungen unterworfen und liegen zwischen 1,36 N und 12,04 N. Es gilt dabei zu beachten, dass die Standardabweichungen

³² Der Hebelarm in x-Richtung entspricht der Hälfte des Scheibendurchmessers. Für Trennwerkzeuge mit einem Scheibendurchmesser von 125 mm entspricht dies einen Hebelarm von 62,55 mm.

sich auf Werkstück 1 und damit auf ein geschweißtes Werkstück beziehen. Es konnte in der Datenauswertung der Einfluss der Schweißnaht auf die Ergebnisse nachgewiesen werden. Demzufolge sind die Standardabweichungen ein gutes Maß für die Genauigkeit der Versuchsreihen wie auch für die Konzeption des Versuchstandes einschließlich der Auswahl der Messtechnik.

Tabelle A-1.1: Standardabweichung Schnittkräfte für TS1 (CER) an Werkstück 1

Eingangsgrößen				Ausgangsgrößen					
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschub	F _x (Mittelw.) [N]	\bar{x} [N]	σ [N]	F _x (Max.) [N]	\bar{x} [N]	σ [N]
1	1	TS1 (CER)	V_{f1}	5,42	5,98	0,56	29,80	26,25	3,55
12	1	TS1 (CER)	V_{f1}	6,53			22,70		
2	1	TS1 (CER)	V_{f2}	5,97	5,36	0,61	28,52	25,04	3,48
24	1	TS1 (CER)	V_{f2}	4,75			21,56		
7	1	TS1 (CER)	V_{f3}	5,13	3,13	2,00	34,81	22,78	12,04
16	1	TS1 (CER)	V_{f3}	1,13			10,74		
4	1	TS1 (CER)	V_{f4}	3,58	4,06	0,48	28,58	24,31	4,28
22	1	TS1 (CER)	V_{f4}	4,54			20,03		
5	1	TS1 (CER)	V_{f5}	1,82	2,95	1,13	31,16	26,16	5,00
26	1	TS1 (CER)	V_{f5}	4,08			21,16		
6	1	TS1 (CER)	V_{f6}	0,68	2,28	1,60	28,68	27,32	1,36
17	1	TS1 (CER)	V_{f6}	3,87			25,96		

A-2: Versuchsreihe 1 und 3: Einfluss größerer Rohraußendurchmesser auf die Rohrrinntrennung am Beispiel von TS1 (CER)

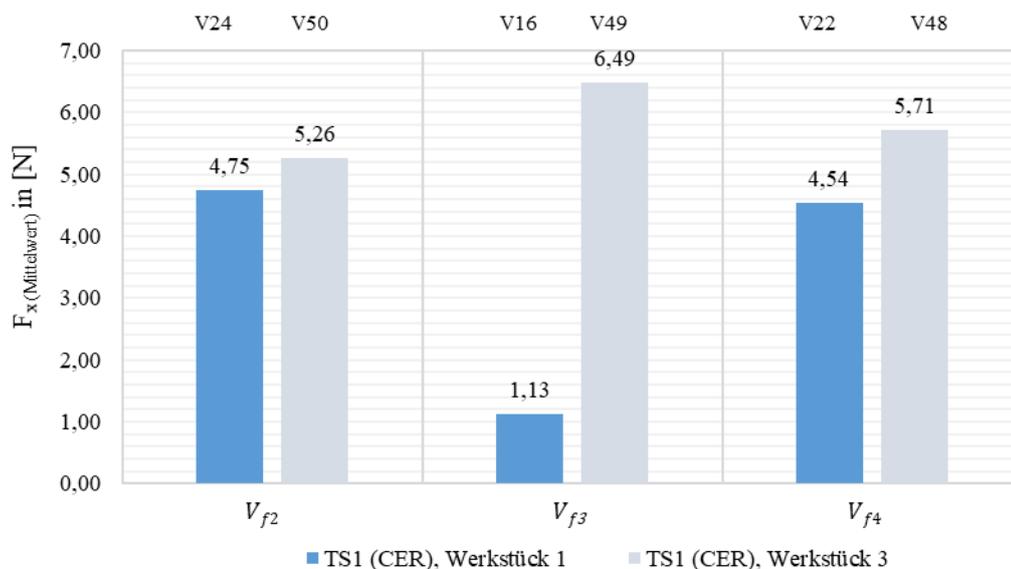
Um eine möglichst universelle Anwendung eines Rohrrinntrennsystems gewährleisten zu können, wird u.a. der Einfluss des Außendurchmessers der zu trennenden Rohrleitungen untersucht (Forschungsfrage 1). Werkstück 3 besitzt einen größeren Außendurchmesser (d_A : 273,00 mm) wie Werkstück 1 (d_A : 219,1 mm) und ist ebenfalls aus dem Werkstoff 1.4541 mit einer Längsschweißnaht hergestellt.

In Tabelle A-2.1 werden für die Vorschubgeschwindigkeiten V_{f2} bis V_{f4} sowohl die durchschnittlichen als auch maximalen Schnittkräfte für TS1 (CER) an Werkstück 1 und 3 gegenübergestellt.

Tabelle A-2.1: Schnittkräfte für TS1 (CER) an Werkstück 1 und 3

Eingangsgrößen				Ausgangsgrößen	
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschub	F _x (Mittelw.) [N]	F _x (Max.) [N]
24	1	TS1 (CER)	V_{f2}	4,75	21,56
50	3	TS1 (CER)	V_{f2}	5,26	23,71
16	1	TS1 (CER)	V_{f3}	1,13	10,74
49	3	TS1 (CER)	V_{f3}	6,49	21,16
22	1	TS1 (CER)	V_{f4}	4,54	20,03
48	3	TS1 (CER)	V_{f4}	5,71	22,02

Es ist zu erkennen, dass bei allen Versuchen die Schnittkräfte (Durchschnitt und Maximum) an Werkstück 3 größer als an Werkstück 1 sind. In Abbildung A-2.1 sind exemplarisch die Schnittkräfte F_x (Mittelwert) für Werkstück 1 und 3 mit TS1 (CER) in Form eines Säulendiagramms dargestellt.

**Abbildung A-2.1:** Vergleich Schnittkraft F_x (Mittelwert) an Werkstück 1 und Werkstück 3 für TS1 (CER)

Die höheren Schnittkräfte an Werkstück 3 können damit begründet werden, dass bei Werkstück 3 infolge des größeren Außendurchmessers mehr Volumen abgetragen wird. Der Volumenabtrag an Werkstück 3 ist sowohl für V50, V49 und V48 jeweils größer als für V24, V16 und V22 an Werkstück 1 (vgl. Abbildung A-2.2). Damit können die Ergebnisse von Versuchsreihe 1 und 2 hinsichtlich der Abhängigkeit von Schnittkraft und Volumenabtrag durch Versuchsreihe 3 bestätigt werden.

Sowohl Werkstück 1 und 3 sind geschweißt und die Ergebnisse infolge des Einflusses der Schweißnaht Schwankungen unterworfen. Bei Versuchsnummer 16 müsste beispielsweise die Schnittkraft F_x (Mittelwert) höher sein. Da aber auch das Volumen für diesen Versuch zu gering ist, dargestellt in Abbildung A-2.2, zeigt sich eine Überstimmung der Daten für Schnittkraft und

Volumenabtrag. Die Messabweichungen können daher auf die Herstellung der Schweißnaht zurückgeführt werden. Durch die Datenauswertung von Versuchsreihe 1 und 2 in Absatz 5.1.3 konnte dieser Zusammenhang belegt werden.

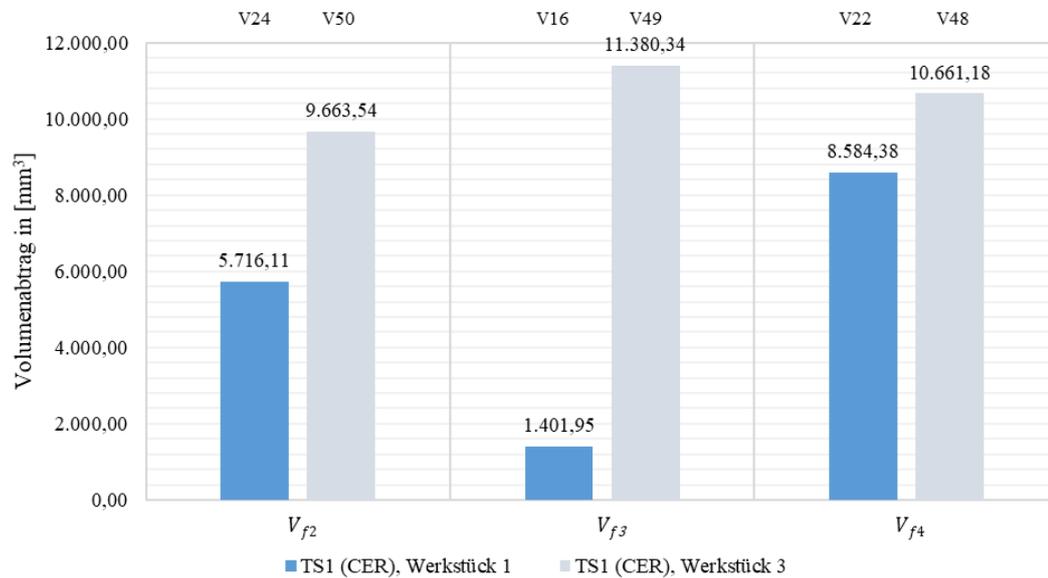


Abbildung A-2.2: Vergleich Volumenabtrag an Werkstück 1 und Werkstück 3 für TS1 (CER)

In Anhang A-3 werden nachfolgend die Versuchspläne für Versuchsreihe 1-5 mit TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) aufgelistet.

A-3: Versuchsplan Vorversuche/Versuchsreihe 1-5 mit TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D)**Tabelle A-3.1:** Versuchsplan Vorversuche Trennscheiben

Vorversuche			
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschubgeschwindigkeit
1	1	TS1 (CER)	V_{f1}
2	1	TS1 (CER)	V_{f2}
3	1	TS1 (CER)	V_{f3}
4	1	TS1 (CER)	V_{f4}
5	1	TS1 (CER)	V_{f5}
6	1	TS1 (CER)	V_{f6}
7 (Wdh. 3)	1	TS1 (CER)	V_{f3}

Tabelle A-3.2: Versuchsplan Versuchsreihe 1 Trennscheiben

Versuchsreihe 1			
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschubgeschwindigkeit
8	1	TS3 (D)	V_{f1}
9	1	TS1 (CER)	V_{f5}
10	1	TS2 (A)	V_{f3}
11	1	TS3 (D)	V_{f6}
12	1	TS1 (CER)	V_{f1}
13	1	SS4/A	V_{f4}
14	1	TS3 (D)	V_{f2}
15	1	TS2 (A)	V_{f5}
16	1	TS1 (CER)	V_{f3}
17	1	TS1 (CER)	V_{f6}
18	1	TS3 (D)	V_{f4}
19	1	TS2 (A)	V_{f2}
20	1	TS3 (D)	V_{f3}
21	1	TS2 (A)	V_{f1}
22	1	TS1 (CER)	V_{f4}
23	1	TS2 (A)	V_{f6}
24	1	TS1 (CER)	V_{f2}
25	1	TS3 (D)	V_{f5}
26 (Wdh. 9)	1	TS1 (CER)	V_{f5}
27 (Wdh. 13)	1	TS2 (A)	V_{f4}

Tabelle A-3.3: Versuchsplan Versuchsreihe 2 Trennscheiben

Versuchsreihe 2			
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschubgeschwindigkeit
28	2	TS1 (CER)	V_{f2}
29	2	TS3 (D)	V_{f2}
30	2	TS1 (CER)	V_{f4}
31	2	TS2 (A)	V_{f6}
32	2	TS3 (D)	V_{f1}
33	2	TS2 (A)	V_{f3}
34	2	TS1 (CER)	V_{f3}
35	2	TS2 (A)	V_{f1}
36	2	TS1 (CER)	V_{f6}
37	2	TS3 (D)	V_{f4}
38	2	TS2 (A)	V_{f2}
39	2	TS3 (D)	V_{f5}
40	2	TS2 (A)	V_{f4}
41	2	TS3 (D)	V_{f6}
42 (Wdh. 30)	2	TS1 (CER)	V_{f4}
43	2	TS1 (CER)	V_{f5}
44	2	TS2 (A)	V_{f5}
45	2	TS1 (CER)	V_{f1}
46	2	TS3 (D)	V_{f3}
47 (Wdh. 28)	2	TS1 (CER)	V_{f2}

Tabelle A-3.4: Versuchsplan Versuchsreihe 3 Trennscheiben

Versuchsreihe 3			
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschubgeschwindigkeit
48	3	TS1 (CER)	V_{f4}
49	3	TS1 (CER)	V_{f3}
50	3	TS1 (CER)	V_{f2}

Tabelle A-3.5: Versuchsplan Versuchsreihe 5 Trennscheiben

Versuchsreihe 5			
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschubgeschwindigkeit
51	5	TS1 (CER)	V_{f5}
52	5	TS3 (D)	V_{f5}

B: Versuchsreihen Scheibenfräser und Kreissägeblätter

B-1: Ergänzende Ausführungen zur Analyse der Schnittkräfte durch 6-Achsen-Kraft-Momentensensor

Die nachfolgenden Erläuterungen am Antriebsmotor für Scheibenfräser und Kreissägeblätter unterscheiden sich von denen für Trennscheiben. Begründet ist dies durch den Aufbau der beiden unterschiedlichen Antriebsmotoren. Während sich der Schwerpunkt des Synchronmotors für Trennscheiben über der Kraftmessdose befindet, ist dies bei dem verwendeten MOVIMIT-Stirnradgetriebemotor für Scheibenfräser und Kreissägeblätter nicht der Fall. Ersichtlich wird dies durch Abbildung B-1.1 und die Vereinfachung des Systems in Abbildung B-1.2.

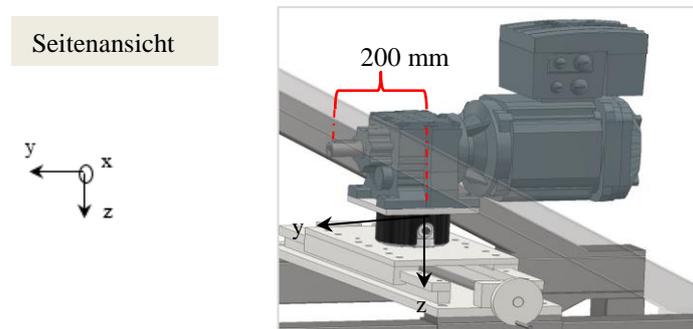


Abbildung B-1.1: Position 6-Achsen-Kraft-Momentensensor unter MOVIMOT-Stirnradgetriebemotor für Antrieb Scheibenfräser und Kreissägeblätter

Das System lässt sich in y- und z- Richtung folgendermaßen darstellen:

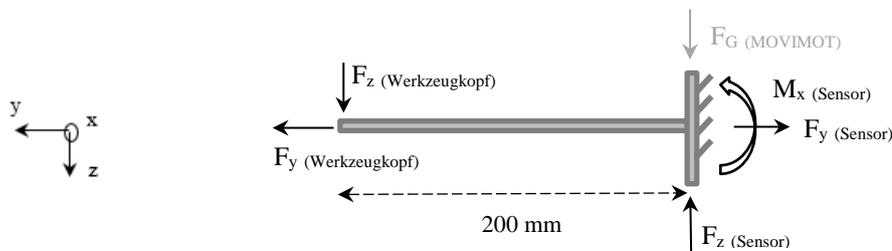


Abbildung B-1.2: Vereinfachte Darstellung der Schnittgrößen für Scheibenfräser und Kreissägeblätter in y- und z-Richtung

Aus dem Kräftegleichgewicht in y-Richtung in Abbildung B-1.2 folgt:

$$0 = F_y (\text{Werkzeugkopf}) - F_y (\text{Sensor}) \quad (2.1)$$

$$F_y (\text{Werkzeugkopf}) = F_y (\text{Sensor})$$

Damit ist nachgewiesen, dass die durch den 6-Achsen-Kraft-Momentensensor aufgezeichnete Kraft in y-Richtung ($F_y (\text{Sensor})$) der wirkenden Kraft in y-Richtung am Werkzeugkopf ($F_y (\text{Werkzeug-}$

F_{kopf}) entspricht. Die Erklärung für die Schnittkraft in x-Richtung ist identisch und wird daher nicht separat erläutert.³³

Die Gewichtskraft F_G in der Einheit Newton [N] des Antriebsmotors für Scheibenfräser und Kreissägeblätter (MOVIMOT-Stirnradgetriebemotor, zu vergleichen in Abbildung 4.15, berechnet sich aus (2.2) zu:

$$F_G = m * g \quad (2.2)$$

$$F_{G(\text{MOVIMOT})} = 23 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 225,63 \text{ N}$$

In z-Richtung wirkt vorwiegend die Gewichtskraft F_G des Antriebsmotors für Scheibenfräser und Kreissägeblätter. Durch die Kalibrierung des 6-Achsen-Kraft-Momentensensors vor jeder Versuchsdurchführung, wirkt die Gewichtskraft des MOVIMOT-Stirnradgetriebemotors nicht in die aufgezeichneten Kräfte und Momente des Sensors mit ein. Die Gewichtskraft $F_{G(\text{MOVIMOT})}$ wird daher im nachfolgenden Kräftegleichgewicht nicht angesetzt. Ansonsten müsste in der Kraft $F_{z(\text{Sensor})}$ der Anteil der Gewichtskraft wieder mit eingerechnet werden. Somit ergibt sich folgendes Kräftegleichgewicht in z-Richtung:

$$0 = F_{z(\text{Werkzeugkopf})} - F_{z(\text{Sensor})}$$

$$F_{z(\text{Werkzeugkopf})} = F_{z(\text{Sensor})}$$

Damit ist nachgewiesen, dass die durch den 6-Achsen-Kraft-Momentensensor aufgezeichnete Kraft in z-Richtung ($F_{z(\text{Sensor})}$) der wirkenden Kraft in z-Richtung am Werkzeugkopf ($F_{z(\text{Werkzeugkopf})}$) entspricht.

B-1.2: Genauigkeit Methodik Schnittkraft

Nachfolgend wird am Beispiel von KSB1 (HSS) anhand der Standardabweichung die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Versuche an Werkstück 4 (nahtlos) nachgewiesen.

Tabelle- B-2.1: Standardabweichung Schnittkräfte für KSB1 (HSS)

Eingangsgrößen					Ausgangsgrößen	
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschub	Drehzahl [min ⁻¹]	F _x (Mittelwert) [N]	F _x (Max.) [N]
90	4	KSB1 (HSS)	V_{f4}	100	33,77	110,72
92	4	KSB1 (HSS)	V_{f4}	100	31,89	90,27
93	4	KSB1 (HSS)	V_{f4}	100	32,02	152,65
Arithmetisches Mittel \bar{x} [N]					32,56	117,88
Standardabweichung σ [N]					0,86	25,96

³³ Der Hebelarm in x-Richtung entspricht der Hälfte des Scheibendurchmessers. Für Trennwerkzeuge mit einem Scheibendurchmesser von 125 mm ergibt dies einen Hebelarm von 62,55 mm.

Tabelle B-2.1 ist zu entnehmen, dass die Standardabweichung für F_x (Mittelwert) bei drei Versuchswiederholungen mit den identischen Eingangsparametern für KSB1 (HSS) 0,86 N beträgt. D.h. die einzelnen Messwerte streuen um 0,86 N um das arithmetische Mittel von 32,56 N. Die Standardabweichung für die Mittelwerte ist mit < 1 N demnach als sehr gut zu bewerten und spricht für eine hohe Genauigkeit der Versuche. Für die Schnittkräfte F_x (Max.) ist die Standardabweichung mit 25,96 N höher, die Maximalkräfte sind damit größeren Schwankungen unterworfen. Dies ist u.a. mit einem kurzzeitigen Verkanten der Trennwerkzeuge im Werkstück zu begründen.

B-2: Vergleich Versuchsreihe 1, 2 und 4 am Beispiel von KSB1 (HSS)

Durch einen Vergleich der Daten an Werkstück 1, 2 und 4, wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Werkstoff mit der Werkstoffnummer 1.0345 sowie der Einfluss der Schweißnaht analysiert (Forschungsfrage 1). Der Vergleich wird exemplarisch mit KSB1 (HSS) durchgeführt.

In Abbildung B-2.1 sind die Schnittkräfte F_x (Mittelwert) für KSB1 (HSS) an Werkstück 1, 2 und 4 bei Vorschubgeschwindigkeit V_{f4} zu sehen. Werkstück 1 und 2 unterscheiden sich lediglich in der nahtlosen Ausführung von Werkstück 2. Der Rohraußendurchmesser (d_A : 219,1 mm), die Wandstärke (6,3 mm) und der Werkstoff (1.4541) sind identisch. Werkstück 4 ist aus dem Werkstoff 1.0345 mit einem Außendurchmesser von 219,1 mm ohne Längsschweißnaht gefertigt.

Bei allen drei Werkstücken trifft die in der Datenauswertung getätigte Aussage, dass die Schnittkraft mit zunehmender Drehzahl sinkt, zu. Bei einem Vergleich der durchschnittlichen Schnittkräfte an Werkstück 1 (geschweißt) und 2 (nahtlos) kann eine niedrigere Schnittkraft am Werkstück mit Längsschweißnaht ausgemacht werden. Dies stimmt mit der Datenauswertung zu Trennscheiben überein. Es konnte aufgezeigt werden, dass infolge der Herstellung die Ovalität geschweißter Rohrleitungen größer ist. Das Trennwerkzeug ist folglich bei der Versuchsdurchführung an einer geschweißten Rohrleitung nicht kontinuierlich im Eingriff, wodurch die Schnittkräfte geringer und größeren Schwankungen ausgesetzt sind. Das Bestimmtheitsmaß für KSB1 (HSS) an Werkstück 1 weist mit $R^2 = 0,6139$ daher eine schlechtere Annäherung an die Trendlinie wie für Werkstück 2 mit $R^2 = 0,9178$ auf. Selbiges gilt für die Rohrintrennung mittels Trennscheiben, hierzu wurden ausführliche Versuchsreihen durchgeführt (vgl. Absatz 5.1.3, Versuchsreihe 1 und 2). Es zeigt sich jedoch, dass die Schwankungen der generierten Daten an Werkstück 1 mit KSB1 (HSS) deutlich kleiner sind wie die mit TS1 (CER), TS2 (A) und TS3 (D) erhobenen Daten. Eine Begründung hierfür könnte in den deutlich höheren Schnittkräften von KSB1 (HSS) gegenüber TS1 – TS3 liegen.

Durch die Versuchsdurchführung an Werkstück 4 (Werkstoff: 1.0345) kann im Allgemeinen festgehalten werden, dass die Rohrintrennung mit KSB1 (HSS) am Werkstoff 1.0345 grundsätzlich erfolgreich ist und mit den gewählten Betriebsparametern vollzogen werden kann. Die Schnittkräfte während der Rohrintrennung an einem unlegierten, warmfesten Baustahl (Werkstück 4) sind bei allen Drehzahlen jedoch geringer wie an Chrom-Nickel-Edelstahl (Werkstück 1+2). D.h. wenn ein Rohrintrennsystem auf die Bearbeitung von Chrom-Nickel-Edelstahl ausgelegt wird, können damit in kerntechnischen Anlagen auch Rohrleitungen aus

Baustahl getrennt werden. Hierdurch wird eine flexible Anwendung des Rohrintrennsystems für die Demontage von Rohrleitungen aus verschiedenen Werkstoffen ermöglicht. Im Grundlankenkapitel in Absatz 2.3.4 sind in Tabelle 2.2 die Werkstoffe von Rohrleitungen, die in Kernkraftwerken zugelassen sind, zusammengefasst.

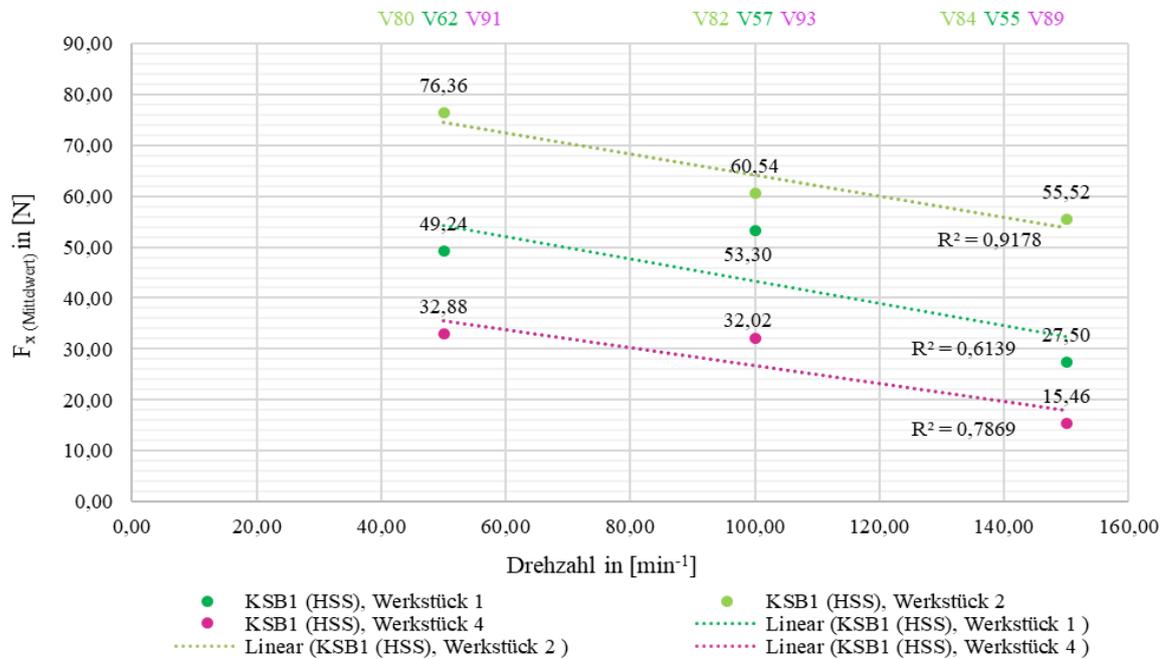


Abbildung B-2.1: Vergleich Schnittkräfte KSB1 (HSS) an Werkstück 1, 2 und 4 bei V_{f4}

Betrachtet man den Volumenabtrag exemplarisch für V82, V57 und V93 bei einer Drehzahl von 100 min^{-1} und Vorschub V_{f4} , kann wie für die restlichen Versuchsreihen festgestellt werden, dass mit sinkender Drehzahl die Schnittkraft und damit einhergehend der Volumenabtrag sinkt. Für Werkstück 4 wird demnach mit den gleichen Betriebsparametern wie an Werkstück 1 und 2 etwas weniger Volumen abgetragen, zu sehen in Abbildung B-2.2.

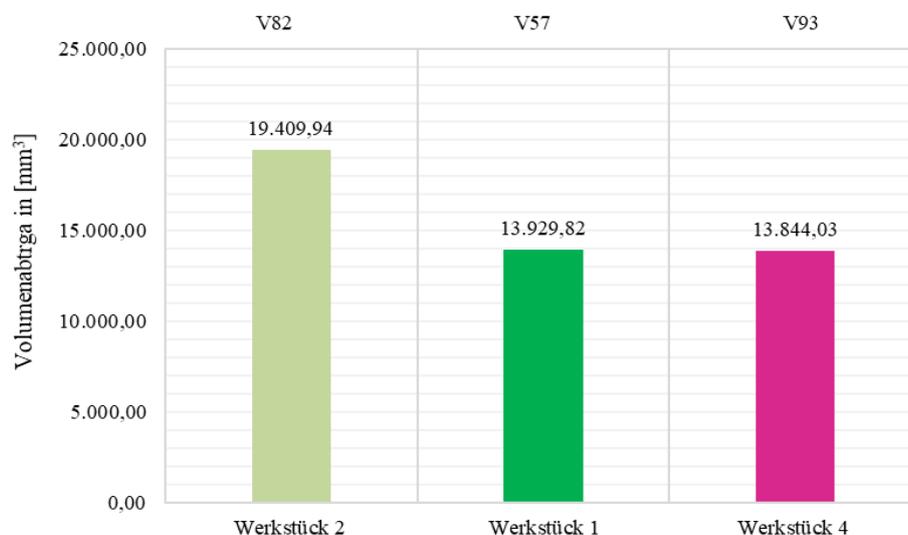


Abbildung B-2.2: Vergleich Volumenabtrag KSB1 (HSS) an Werkstück 2, 1 und 4 bei 100 min^{-1} und V_{f4}

B-3: Versuchsreihe 1 und 3: Einfluss größerer Rohraußendurchmesser auf die Rohrrinntrennung am Beispiel von KSB1 (HSS)

Der vorliegende Absatz dient dem Nachweis der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Werkstücke mit einem größeren Rohraußendurchmesser. Wie bei der Versuchsdurchführung mit Trennscheiben, zu vergleichen in Absatz A-2, treten an Werkstück 3 (d_A : 273,0 mm) infolge des größeren Außendurchmessers größere Schnittkräfte wie an Werkstück 1 (d_A : 219,1 mm) auf. Abbildung B-3.1 gibt diesen Zusammenhang wieder. Sowohl Werkstück 1 als auch Werkstück 3 sind mit einer Längsschweißnaht gefertigt. Hiermit lassen sich die kleinen Schwankungen der Schnittkräfte begründen.

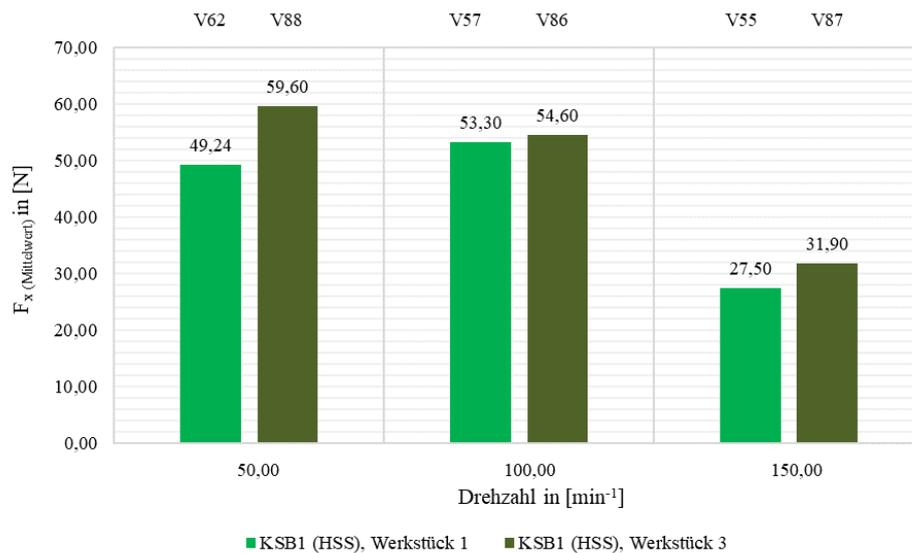


Abbildung B-3.1: Vergleich Schnittkraft KSB1 (HSS) an Werkstück 1 und 3 bei V_{f4}

Wie u.a. in der Datenauswertung in Absatz 5.2.3 mit Abbildung 5.32 nachgewiesen werden konnte, sinkt bei Erhöhung der Drehzahl die Schnittkraft, woraus ein reduzierter Volumenabtrag folgt. Als Grund hierfür konnte eine Abnahme der Standzeit durch eine höhere Wärmeentwicklung an der Werkzeugschneide identifiziert werden.

Abschließend werden in Anhang B-4 für die in den experimentellen Versuchsreihen untersuchten Trennwerkzeuge SF1 (HSS), KSB1 (HSS), KSB2 (HSS, TiAlN) und KSB3 (VHM, TiAlN) die Versuchspläne aufgeführt.

B-4: Versuchsplan Vorversuche/Versuchsreihe 1-5 mit SF1 (HSS), KSB1 (HSS), KSB2 (HSS, TiAlN) und KSB3 (VHM, TiAlN)

Tabelle B-4.1: Versuchsplan Vorversuche KSB1 (HSS)

Vorversuche				
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschubgeschwindigkeit	Drehzahl [min ⁻¹]
53	1	KSB1 (HSS)	V_{f2}	150
54	1	KSB1 (HSS)	V_{f6}	150
55	1	KSB1 (HSS)	V_{f4}	150
56	1	KSB1 (HSS)	V_{f0}	150
57	1	KSB1 (HSS)	V_{f4}	100
58	1	KSB1 (HSS)	V_{f0}	100
59	1	KSB1 (HSS)	V_{f2}	100
60	1	KSB1 (HSS)	V_{f6}	100
61	1	KSB1 (HSS)	V_{f2}	50
62	1	KSB1 (HSS)	V_{f4}	50
63	1	KSB1 (HSS)	V_{f0}	50
64	1	KSB1 (HSS)	V_{f6}	50

Tabelle B-4.2: Versuchsplan Versuchsreihe 1

Versuchsreihe 1				
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschubgeschwindigkeit	Drehzahl [min ⁻¹]
65	1	KSB2 (HSS, TiAlN)	V_{f4}	100
66	1	KSB2 (HSS, TiAlN)	V_{f4}	200
67	1	KSB2 (HSS, TiAlN)	V_{f2}	200
68	1	KSB2 (HSS, TiAlN)	V_{f2}	100
69	1	KSB2 (HSS, TiAlN)	V_{f3}	200
70	1	KSB3 (VHM, TiAlN)	V_{f3}	150
71	1	KSB1 (HSS)	V_{f3}	50
72	1	KSB1 (HSS)	V_{f3}	100
73	1	KSB3 (VHM, TiAlN)	V_{f3}	250
74	1	KSB2 (HSS, TiAlN)	V_{f3}	100
75	1	KSB1 (HSS)	V_{f3}	150
76	1	KSB2 (HSS, TiAlN)	V_{f3}	150
77	1	KSB3 (VHM, TiAlN)	V_{f3}	200

Tabelle B-4.3: Versuchsplan Versuchsreihe 2

Versuchsreihe 2				
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschub- geschwindigkeit	Drehzahl [min ⁻¹]
78	2	SF1 (HSS)	V_{f4}	50
79	2	KSB1 (HSS)	V_{f4}	200
80	2	KSB1 (HSS)	V_{f4}	50
81	2	SF1 (HSS)	V_{f4}	150
82	2	KSB1 (HSS)	V_{f4}	100
83	2	SF1 (HSS)	V_{f4}	200
84	2	KSB1 (HSS)	V_{f4}	150
85	2	SF1 (HSS)	V_{f4}	100

Tabelle B-4.4: Versuchsplan Versuchsreihe 3

Versuchsreihe 3				
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschub- geschwindigkeit	Drehzahl [min ⁻¹]
86	3	KSB1 (HSS)	V_{f4}	100
87	3	KSB1 (HSS)	V_{f4}	150
88	3	KSB1 (HSS)	V_{f4}	50

Tabelle B-4.5: Versuchsplan Versuchsreihe 4

Versuchsreihe 4				
Versuchsnummer	Werkstück	Trennwerkzeug	Vorschub- geschwindigkeit	Drehzahl [min ⁻¹]
89	4	KSB1 (HSS)	V_{f4}	150
90	4	KSB1 (HSS)	V_{f4}	100
91	4	KSB1 (HSS)	V_{f4}	50
92	4	KSB1 (HSS)	V_{f4}	100
93	4	KSB1 (HSS)	V_{f4}	100

C: Detailinformationen Prototyp

Der von der Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH entwickelte Prototyp zur Rohrintrennung besteht aus den folgenden sechs Einheiten: Trägersystem, Spannsystem, Werkzeugkopf, Antriebseinheit, Lokale Absaugung und Steuerung. Nachfolgend werden die Einheiten stichpunktartig beschrieben. Die Informationen zum Prototyp werden aus Gründen der Vollständigkeit aufgeführt, die Entwicklung und Konstruktion sind nicht Teil der Arbeit. Das Gesamtsystem ist in Abbildung C-1 zu sehen.



Abbildung C-1: Gesamtsystem Prototyp [145, S. 17]

Trägersystem

- Trägersystem baut auf einer zentrisch angeordneten, dickwandigen Hohlwelle auf;
- An Adapterplatte erfolgt Montage des Werkzeugkopfes; am anderen Ende erfolgt Montage des Zwischengetriebes für Spannsystem;
- Trägersystem enthält Befestigungsbohrungen für Spannsystem.

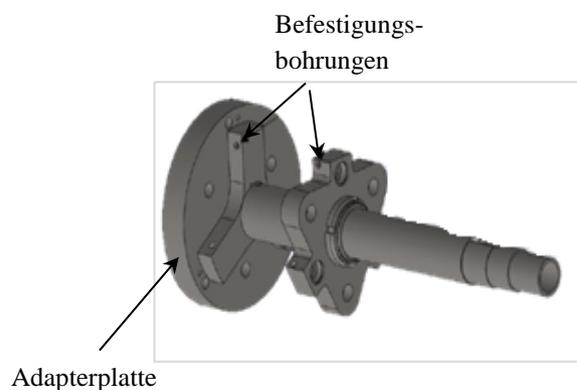


Abbildung C-2: Trägersystem [145, S. 18]

Spannsystem

- An verschiedene Durchmesser anpassbar
- Zentrale Führung durch Spindelhalterträger und Gleitbuchse;
- Spannen erfolgt durch drei synchron angetriebene Trapezgewindespindeln.

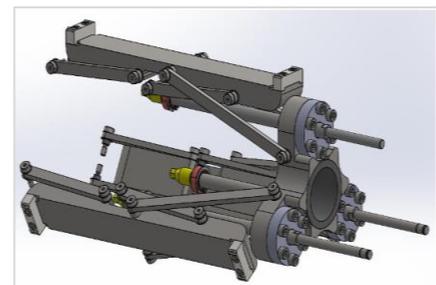


Abbildung C-3: Spannsystem [145, S. 19]

Werkzeugkopf

- Bewegungsfreiheit des Werkzeuges für Vorschub, Zustellung und Werkzeugantrieb;
- Durch Werkzeugarm an verschiedene Durchmesser anpassbar;
- Zentrales Rohr für Absaugung.

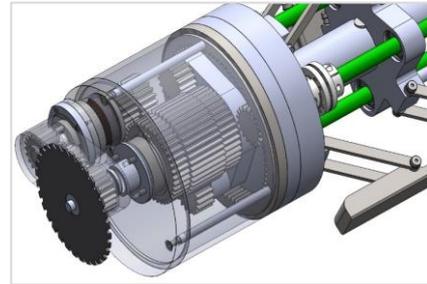


Abbildung C-4: Werkzeugkopf [145, S. 20]

Lokale Absaugung

- Aufbau des Prototyps um ein zentrales, durchgehendes Hohl-Rohr;
- Eine Absaugeinheit kann über einen Adapter am Ende der Hohlwelle zwischen den Antriebseinheiten installiert werden.

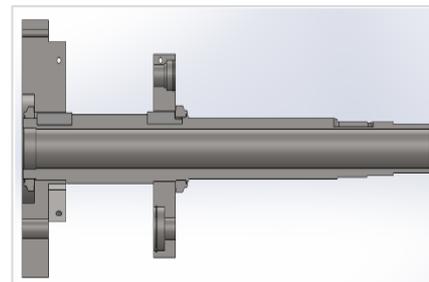


Abbildung C-5: Lokale Absaugung [145, S. 21]

Antriebseinheit

- Werkzeugantrieb, Vorschub- und Zustelleinheit werden als Antriebseinheit zusammengefasst;
- Die Antriebseinheit besteht aus drei Servomotoren; deren Antriebsmomente werden durch eine Klauenkupplung auf Wellen bis zur Bearbeitungseinheit übertragen.

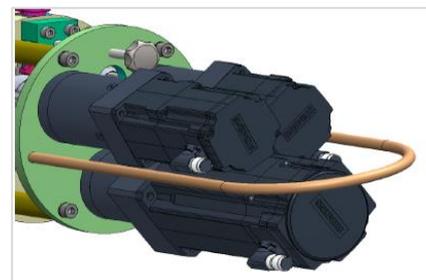


Abbildung C-6: Antriebseinheit [145, S. 20]

Steuerung

- Rohrtrennung erfolgt vollautomatisiert;
- Geometrische Daten der Rohrleitung und Parameter der Antriebe müssen durch das Bedienpersonal in die Software eingegeben werden.