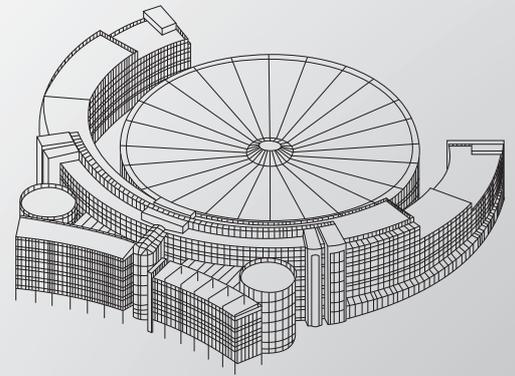


BERICHTE AUS DEM PRODUKTIONSTECHNISCHEN ZENTRUM BERLIN



Pavlo Lypovka

Werkzeug- und prozesseitige Grundlagen des Schienenschleifens unter Berücksichtigung der Schientemperatur und der Wechselwirkung mit dem Einsatzverhalten der Schiene

BERICHTE AUS DEM PRODUKTIONSTECHNISCHEN ZENTRUM BERLIN

Pavlo Lypovka

Werkzeug- und prozessseitige Grundlagen des Schienenschleifens unter Berücksichtigung der Schienentemperatur und der Wechselwirkung mit dem Einsatzverhalten der Schiene

Herausgeber:

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. E. Uhlmann

Prof. Dr.-Ing. R. Jochem

Prof. Dr.-Ing. H. Kohl

Prof. Dr.-Ing. J. Krüger

Prof. Dr.-Ing. M. Rethmeier

Prof. Dr.-Ing. G. Seliger

Prof. Dr.-Ing. R. Stark

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstraße 8-9
10587 Berlin
Telefon 030 39006-0
Fax 030 39110-37
E-Mail info@ipk.fraunhofer.de
URL www.ipk.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über www.dnb.de abrufbar.
ISBN (Print): 978-3-8396-1306-1

D 83

Zugl.: Berlin, TU, Diss., 2017

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2018

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Fax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Werkzeug- und prozessseitige Grundlagen des Schienenschleifens unter Berücksichtigung der Schienentemperatur und der Wechselwirkung mit dem Einsatzverhalten der Schiene

Vorgelegt von
Master of Science
Pavlo Lypovka
aus Jenakijewe, Ukraine

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Marc Kraft

Gutachter: Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 08.08.2017

Berlin 2018

D83

Vorwort des Herausgebers

Durch die Steigerung der Qualität, Planbarkeit und Reproduzierbarkeit von Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) lassen sich signifikante wirtschaftliche Effekte beim Betrieb kostenintensiver Bauteile erzielen. In der Prozesskette zur Instandhaltung von Eisenbahnschienen hat das Schienenschleifen eine zentrale Rolle inne, da es für die Herstellung der finalen Oberflächen- und Randzonenbeschaffenheit und die Dauer des darauffolgenden Schienenbetriebes verantwortlich ist. Zur vollständigen Ausschöpfung des fertigungstechnischen Potenzials des Schienenschleifens stellt die technologische Beherrschung dieses Schleifverfahrens und deren gezielte Auslegung für unterschiedliche Reparaturszenarien im Gleis eine Grundvoraussetzung dar. Ein wesentlicher Unterschied zu den üblichen Feinbearbeitungsverfahren besteht dabei darin, dass beim Schienenschleifen witterungsbedingte Faktoren als eine zusätzliche relevante Einflussgröße auf die Kennwerte des Bearbeitungsergebnisses berücksichtigt werden müssen.

Vor diesem Hintergrund war es das Ziel der Arbeit, die werkzeug- und prozesseitigen Grundlagen des Schienenschleifens unter Berücksichtigung der Schientemperatur und des nachfolgenden tribologischen Einsatzverhaltens geschliffener Schienen zu untersuchen. Das Hauptergebnis der Arbeit ist die Schaffung einer Wissensdatenbank, die die Zusammenhänge zwischen der Werkzeugzusammensetzung, dem Schleifprozess, der Schientemperatur und dem Bearbeitungsergebnis beschreibt. Zum besseren Verständnis des Einflusses verschiedener Schientemperaturen auf die Abtrennmechanismen sind grundlegende Untersuchungen der Spanbildung durchgeführt worden. Durch die tribologischen Untersuchungen an den geschliffenen Schienen in skalierten und unskalierten Modi erfolgte darüber hinaus Qualifizierung des Einflusses der Schleifbearbeitungsergebnisse auf das tribologische Einsatzverhalten von Schienen. Auf dieser Basis konnte der Zusammenhang zwischen der eingebrachten Prozessenergie und der Randzoneneigenschaften nach dem Schleifen mit der Schienenliegedauer vor erneuter Schieneninstandsetzung aufgestellt werden. Abschließend erfolgte die Entwicklung eines Modells, mit dem durch die reine Variation der Prozessstellgrößen auf saisonal veränderte Schientemperaturen reagiert werden kann, um eine Schienenrandzone für eine lange Liegedauer zwischen Instandsetzungsintervallen zu realisieren. Auf Basis dieses Modells wurden die Anwendungsempfehlungen bezüglich des Maßes der Randzonenveränderung und der Schleifenergie abgeleitet und anhand von Validierungsversuchen an realen Bauteilen bestätigt.

Die vorliegende Arbeit stellt somit erste wissenschaftliche Grundlagen des Schienenschleifens aus fertigungstechnischer Sicht zur Verfügung. Durch die umfangreichen Versuchs- und Modellierungsergebnisse werden Hinweise zur Prozessgestaltung erarbeitet, die es ermöglichen, die Schienenschleifbearbeitung in Anhängigkeit lokaler Produktivitäts- und Qualitätskennwerte und unter Berücksichtigung witterungsbedingter Einflussfaktoren prozesssicher durchzuführen. Dies kann zur Steigerung der Qualität und Wirtschaftlichkeit der Schienenschleifvorgänge am Gleis beitragen.

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin.

Herrn Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, Leiter des Fachgebietes Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin, sowie gleichzeitig Institutsleiter des Fraunhofer-Institutes für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK), gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit und Betreuung meines Promotionsvorhabens, die die Anfertigung dieser Arbeit ermöglicht haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke, Professor für Fertigungstechnik am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen, sowie gleichzeitig Institutsleiter des Fraunhofer-Institutes für Produktionstechnik (IPT), danke ich für die Übernahme des Korreferats, das dieser Arbeit entgegengebrachte Interesse und fachliche Diskussion der Ergebnisse der Arbeit. Für die Übernahme des Promotionsvorsitzes danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Marc Kraft, Leiter des Fachgebietes Medizintechnik am Institut für Maschinenkonstruktion und Systemtechnik der Technischen Universität Berlin.

Der Großteil der Arbeitsergebnisse entstand im Rahmen des Projektes „Grundlagen des Schienenschleifens und der Wechselwirkung mit dem tribologischen Einsatzverhalten der Schiene“, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). Dafür möchte ich mich herzlich bei der DFG bedanken. Den Kooperationspartnern aus Industrie und Forschung, Herrn Armadahan Sahin, Berliner Verkehrsbetriebe AÖR (BVG), Herrn Matthias Luther, Deutsche Bahn Systemtechnik GmbH, Herrn Dr. Valerii Makovei, Institut für Mechanik und Maschinenbau (MMI) der Nationalen Technischen Universität der Ukraine „Kiewer Polytechnisches Institut“ (NTUU „KPI“) sowie Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Schöch, Speno AG, sei an dieser Stelle für die stets konstruktive Zusammenarbeit herzlich gedankt.

Ein großer Dank gilt allen Kollegen des Fachgebietes Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik des IWF der Technischen Universität Berlin, der Abteilung Produktionssysteme des Fraunhofer IPK sowie der Verwaltung des Produktionstechnischen Zentrums (PTZ) Berlin, mit denen ich während meiner Tätigkeit in engem Kontakt stand. Insbesondere bin ich dem Team der Feinbearbeitung-Fachgruppen des IWF für die hervorragende Zusammenarbeit aber auch einzigartige Arbeitsatmosphäre dankbar. Unter den Kollegen gilt mein besonderer Dank Herrn Leif Hochschild für die zahlreichen spannenden Diskussionen und äußerst hilfreichen Anregungen während der Entstehung der Arbeit sowie für die Korrektur des Manuskriptes. Ferner möchte ich mich bei den ehemaligen Vorgesetzten, Herrn Dr.-Ing. Arne Dethlefs, Herrn Nikolas Schröer, Herrn Gregor Hasper und Herrn Dr.-Ing. Florian Heitmüller bedanken, die meinen beruflichen Weg am IWF immer gefördert haben und von denen ich viel lernen durfte. Herrn Dr.-Ing. Stefan Gebhard, Herrn Ivan Perfilov und Herrn Sascha Zimmermann möchte ich für die zahlreichen fachlichen Hinweise herzlich danken.

Meinen ehemaligen studentischen Mitarbeitern Herrn Jaroslaw Kolosowski, Herrn Richard Schoechert, Herrn Johannes Krüger, Herrn Daniel Tat und Herrn Rafal Wielinski bin ich für ihr Engagement und ihre Ausdauer bei der Durchführung und Auswertung von technologischen Untersuchungen äußerst dankbar. Für die Unterstützung bei der Realisierung der Versuchsinfrastruktur zum Schienenschleifen bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern der IWF-Werkstatt. Frau Marie Schallehn möchte ich für die Anfertigung zahlreicher metallographischer Proben und die fachliche Unterstützung bei der Durchführung von Gefügeanalysen herzlich danken.

Meine Arbeit widme ich meinen Eltern Nadiia Myroshnychenko und Oleksandr Lypovka sowie meiner Schwester Hanna Bondarchuk. Meine Eltern haben meine Ausbildung ermöglicht und mich stets gefördert, auch in Zeiten der politisch instabilen Lage in meinem Heimatland. Dafür gilt ihnen ein ganz besonderer Dank.

Berlin, Oktober 2017

Pavlo Lypovka

Inhaltsverzeichnis

0	Formel- und Kurzzeichen	III
1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse	3
2.1	Schienen.....	3
2.1.1	Herstellung und mechanische Eigenschaften	3
2.1.2	Rad/Schiene-Kontakt.....	4
2.1.3	Schienenverschleiß	7
2.1.4	Erkenntnisse und Ansätze zur Analyse des Einsatzverhaltens von Schienen.....	10
2.2	Schleifen mit rotierenden Werkzeugen.....	10
2.2.1	Grundlagen.....	10
2.2.2	Erkenntnisse zur Energie- und Wärmeentwicklung beim Schleifen.....	11
2.2.3	Erkenntnisse zur Schleifbearbeitung von temperierten Werkstücken.....	13
2.2.4	Erkenntnisse zum Einfluss von Schmiermengen auf die Prozesskenn- größen und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schleifen ...	13
2.2.5	Erkenntnisse zum Einfluss von Korundart und -anteil auf die Prozesskenngrößen und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schleifen	15
2.2.6	Erkenntnisse und Ansätze zur Analyse von Spanbildungsmechanismen beim Schleifen	15
2.3	Schienenschleifen als Teil der Schieneninstandhaltung	17
2.3.1	Struktur der Schieneninstandhaltung	17
2.3.2	Detektion des Schienenzustandes.....	18
2.3.3	Erkenntnisse zum Schienenschleifen zur Reparaturanwendung.....	18
2.3.4	Alternative Fertigungsverfahren zur Schieneninstandhaltung	25
2.3.5	Externe Einflussfaktoren auf das Schienenschleifen.....	25
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	26
4	Versuchsbedingungen und Messmethoden	32
4.1	Prozesskinematik und Versuchsplanung.....	32
4.2	Versuchsmaschine und -aufbau.....	35
4.3	Vorgehensweise und Versuchsumgebung zur Schienentemperierung.....	37
4.4	Werkzeuge und Werkstücke	41
4.5	Mess- und Analysevorrichtungen	45
4.6	Auswerte- und Modellierungsmethodik	50
5	Messverfahren und -vorgehensweise zur zerstörungsfreien Qualifizierung von Schienenrandzonen mithilfe mikromagnetischer Kenngrößen.....	52
6	Einfluss der Schienentemperatur bei variierenden Prozessstellgrößen auf die Spanbildungsmechanismen beim Schienenschleifen	67
7	Einfluss der Schienentemperatur und prozessseitiger Randbedingungen auf die Prozesskenngrößen und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen	82
7.1	Allgemeines	82
7.2	Schienentemperatur.....	87

7.3	Schmiermengen.....	101
7.4	Werkzeugstellgrößen	110
7.5	Hochleistungsschleifbearbeitung.....	122
7.6	Fazit.....	128
8	Tribologisches Einsatzverhalten von geschliffenen Schienen.....	130
9	Übertragbarkeit der Grundlagenerkenntnisse auf Industrieanwendungen und Einsatzempfehlungen	140
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	151
11	Literatur- und Normenverzeichnis	155
12	Anhang	165

0 Formel- und Kurzzeichen

Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	m/s ²	Beschleunigung
A ₁ , A ₂	mm ²	Querschnittsflächen der seitlichen Aufwürfe einer Ritzspur
a _e	mm	Zustellung
a _{ed}	mm	Abrichtzustellung
a _{er}	mm	Ritzzustellung
A _g	mm ²	Kontaktfläche im Rad/Schiene-Kontakt
A _k	J/cm ²	Kerbschlagzähigkeit
Al		Aluminium
a _p	mm	Eingriffsbreite
A _r	mm ²	Ritzquerschnittsfläche
B	mm	Schienenbreite
b _{eff}	mm	effektive Schleifbreite
C	mm	Geradheit der Schienenfahrfläche
C		Kohlenstoff
Cr		Chrom
d	mm	Durchmesser
d _{kg}	mm	Schleifscheibendurchmesser
E'' _c	kJ/mm ²	kontaktflächenbezogene Schleifenergie
e _c	kJ/mms	spezifische Schleifenergie
e _{cr}	kJ/mms	spezifische Ritzenergie
F' _n	N/mm	bezogene Schleifnormalkraft
F' _t	N/mm	bezogene Schleiftangentialkraft
F _n	N	Schleifnormalkraft
F _{nr}	N	Ritznormalkraft
F _t	N	Schleiftangentialkraft
F _{tr}	N	Ritztangentialkraft
H	mm	Schienenhöhe
HBW		Brinell-Härte
H _{cp}	A/cm	Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus μ(H)-Kurve

0 Formel- und Kurzzeichen

H_{cM}	A/cm	Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der M(H)-Kurve
H_{co}	A/cm	Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus dem Verfahren Oberwellenanalyse
h_{cu}	mm	Spanungsdicke
$h_{cu\ max}$	mm	maximale unverformte Spanungsdicke
HV		Vickers-Härte
Im	V	Imaginärteil des Wirbelstrom-Signals
K	%	Klirrfaktor
l	mm	Länge
l_A	m	Achsabstand
l_b	μm	Brückenlänge
l_g	mm	Kontaktlänge
m	kg	Gewicht
M_{max}	mA	Maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens
Mn		Mangan
M_ζ	Nm	Bohrmoment
n	min^{-1}	Drehzahl
N	N	Normalkraft im Rad/Schiene-Kontakt
n		Anzahl
P	kW	Leistung
ρ		Kennzahl zur Bewertung der Signifikanz der Modelleingangsgrößen
P''_c	kW/mm^2	kontaktflächenbezogene Schleifleistung
Q'_w	mm^3/mms	bezogenes Zeitspannungsvolumen
Q_{KSS}	l/min	Volumenstrom des Schmierstoffes
Ra	μm	arithmetischer Mittelwert der Profildordinaten
Re	V	Realteil des Wirbelstrom-Signals
r_K	m	Bogenradius einer Schienenstrecke
Rz	μm	mittlere Höhe des Profils
S		Schwefel
S'_{dyn}		dynamische Schneidenzahl
S'_{stat}		statische Schneidenzahl
T	$^\circ\text{C}$	Temperatur
t	s	Zeit
t_B	s	Beanspruchungsdauer eines Verschleißvorganges

T_{kz}	$^{\circ}\text{C}$	Kontaktzonentemperatur
T_r	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur der Schiene während des Einkornritzens
T_s	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur der Schiene während des Schleiftests
T_t	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur der Schiene während des Tribotests
t_t	s	Dauer eines Tribotests
T_{η}	N	Lateralkraft im Rad/Schiene-Kontakt
T_{ξ}	N	Tangentialkraft im Rad/Schiene-Kontakt
T_{ξ}	Nm^2	Tangentialspannung
U_d		Überdeckungsgrad
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
v_f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_{ft}	mm/min	tangentiale Vorschubgeschwindigkeit
v_g	m/s	Gleitgeschwindigkeit
V_{mag}	V	Amplitude der Endstufenspannung
v_s	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
v_{sr}	m/s	Ritzumfangsgeschwindigkeit
V_w	mm^3	Spannungsvolumen
x_i		unabhängige Variablen einer multiplen linearen Regressionsanalyse
y_1, y_2	mm	Aufwurfhöhen einer Ritzspur
Y_i		Zielgrößen einer multiplen linearen Regressionsanalyse
z	mm	Tiefe
ΔH	mm	Höhenausdehnung der Schiene
Δm	g	Masseverschleiß
Δr_s	mm	Schleifscheibenradialverschleiß
ΔT	$^{\circ}\text{C}$	Temperaturabweichung
Δt	s	Veränderung der Schleifkontaktzeit
Δx	mm	Längsversetzen des Schleifkornes beim Einkornritzen

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
β_i		Achsenabschnitt in einer multiplen linearen Regressionsanalyse
ε	mm	Dehnung
λ_k	μm	Kornabstand
μ		Reibungskoeffizient
μ_{max}	V	Maximum der $\mu(H)$ -Kurve innerhalb einer Periode
σ	Nm^2	Normalspannung
v_ζ		Bohrschlupf
v_η		Querschlupf
v_ξ		Längsschlupf

Abkürzungen

Zeichen	Bezeichnung
BR	Barkhausen-Rauschen
CD	continuous dressing
CHD	case hardness depth
CT	Computertomographie
LCC	life cycle costs
MGT	million gross tons
MLR	multiple lineare Regressionsanalyse
MMS	Minimalmengenschmierung
MRO	maintenance, repair, overhaul
NC	numerical control
OA	Oberwellenanalyse
RAMS	reliability, maintainability, availability, safety
RCF	rolling contact fatigue
REM	Rasterelektronenmikroskop
ÜP	Überlagerungspermeabilität
WEL	white etching layer
WS	Wirbelstrom

1 Einleitung

Schienennetze sind wesentlicher Bestandteil des modernen Mobilitätskonzeptes. Für die Zukunft wird eine stetige Steigerung des Fahrgastaufkommens prognostiziert, was schon heutzutage innovative Mobilitäts- aber auch Instandhaltungslösungen für bestehende Schienennetze erfordert. Damit steigen die Anforderungen an die Infrastrukturkomponenten im Schienenverkehr hinsichtlich der Leistungsfähigkeit, des Verschleißwiderstandes und der Wirtschaftlichkeit rasant. Dabei rückt das Bündel von Maßnahmen zur Wartung und Instandsetzung, die sogenannten maintenance, repair and overhaul (MRO), immer mehr in den Fokus, die einer Wiederherstellung und Beibehaltung des technologischen Zustandes verschleißkritischer Bauteile dienen. Bezogen auf das Infrastrukturbauteil Schiene bedeutet die Durchführung einer systematischen Instandsetzung ein Kostenersparnis um bis zu 60 % gegenüber einem Austausch [MAT10].

Das Reparaturverfahren Schienenschleifen spielt eine herausragende Rolle bei den Infrastrukturarbeiten im Gleis. Das primäre Ziel des Schienenschleifens ist die Entfernung verschlissener bzw. ermüdeter Materialschichten von der Schienenfahrfäche und die Wiederherstellung erforderlicher Maß- und Formgenauigkeiten am Schienenprofil. Da das Schienenschleifen tendenziell als Endbearbeitungsverfahren eingesetzt wird, sind die hiermit erzielten Oberflächen- und Randzonenqualitäten für die nachfolgenden Einzeigenschaften der Schiene essentiell.

Aufgrund der nur begrenzt vorliegenden Erkenntnisse der Grundlagenforschung werden die Werkzeuge und Prozesse zum Schienenschleifen derzeit erfahrungsbasiert nach lokalen Gegebenheiten ausgewählt und sind zum Teil nur begrenzt geeignet. Einen weiteren Ausgangsaspekt der Arbeit stellt die Tatsache dar, dass die Anforderungen an die Betriebsmittel für die Produktion und den Reparatur-Betrieb sich deutlich unterscheiden. Unter anderem sind bei den Schleifarbeiten „vor Ort“ die externen Einflussfaktoren, wie die Schienentemperatur oder der Niederschlag, zu berücksichtigen. Bei höchster Bearbeitungsproduktivität können durch das begrenzt vorhandene technologische Wissen zum Schienenschleifen die Anforderungen an Qualität und Schädigungsarmut der Bearbeitung häufig nicht erreicht werden. Dies führt zu nicht einheitlichen Reparaturergebnissen sowie Schwankungen der Oberflächenqualität und Randzonenbeschaffenheit innerhalb der reparierten Schienenstrecke.

In diesem Kontext besteht ein großes Potenzial für die Grundlagenforschung mit dem Ziel, die Auswirkung unterschiedlicher Schienenschleifprozesse auf die Qualität der Bearbeitung sowie die erzeugte thermische Randzonenbeeinflussung systematisch zu untersuchen. Die ungenutzten Verfahrenspotenziale können durch die Schaffung einer Grundlagenkenntnisdatenbank ausgeschöpft werden. Zur qualitativen Bewertung der Schienenschleifbearbeitung ist insbesondere die Analyse des darauffolgenden Einsatzverhaltens der geschliffenen Schienen im Betrieb unverzichtbar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden erste prozess- und werkzeugseitige Grundlagen des Schienenschleifens geschaffen. Das Hauptziel der Arbeit besteht in der Erarbeitung der werkzeug- und prozessseitigen Grundlagen des Schienenschleifens und der Wechselwirkung mit dem Einsatzverhalten der Schiene. Ein wesentliches Teilziel ist dabei die Qualifizierung des Zusammenhanges zweier externen Einflussfaktoren, der Schienentemperatur und des Niederschlages, mit den Bearbeitungsergebnissen. Für ein tieferes Verständnis der temperatur- und stellgrößenabhängigen Spanbil-

dungsmechanismen beim Schienenschleifen werden Einkornritzversuche durchgeführt. Ferner wird eine Vorgehensweise zur zerstörungsfreien Qualifizierung der Schienenrandzonen nach dem Schleifen unter Verwendung mikromagnetischer Kenngrößen erarbeitet und die Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse auf reale Anwendungen aufgezeigt. Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen fließen in deskriptive Modelle zum Schienenschleifen ein. Durch die in der Arbeit erzielte Wissensdatenbank werden für Industrieanwender sehr gute Voraussetzungen zur Verbesserung von Planbarkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit der Schleifarbeiten im Gleis geschaffen.

2 Stand der Erkenntnisse

Der schienengebundene Verkehr stellt seit der Mitte des neunzehnten Jahrhunderts einen der Grundsteine der personengebundenen Mobilität dar. Hierbei zählen die Eisenbahnschienen zu den größten Kostentreibern im Infrastrukturbereich. Im Zuge der derzeit rasch steigenden Anforderungen hinsichtlich wirtschaftlicher Betriebsstandzeiten und Vermeidung von Streckensperrzeiten hat die Bedeutung von Instandhaltungsmaßnahmen an den Schienen während der letzten zwei Dekaden stark zugenommen. Die zusätzlichen fahrgastspezifischen Bedürfnisse in Bezug auf möglichst geringe Überfahrgeräuschemissionen und hoher Fahrkomfort stellen derzeitige, anhand des empirischen Wissens ausgelegte, Instandhaltungsverfahren vor große Herausforderungen.

Zur vollständigen Ausnutzung des werkstofftechnischen Potentials der Schienen und Steigerung der Qualität und Nachhaltigkeit von Instandhaltungsvorgängen soll eine Systematisierung der vorhandenen Erkenntnisse und darauf aufbauend die Generierung einer Grundlagenwissensbasis für konkrete Anwendungen aus dem Bereich der Schieneninstandhaltung erfolgen. Mit ihrer Hilfe sollen für konkrete Randbedingungen eine Auswahl von Verfahren und Werkzeugen, verbunden mit der Abschätzung von Endqualität der Bearbeitung, realisiert werden, was signifikant zur Verbesserung der reliability, maintainability, availability, safety (RAMS) beim Schienennetzbetrieb beitragen kann.

2.1 Schienen

2.1.1 Herstellung und mechanische Eigenschaften

Der primäre Einsatzzweck von Schienen besteht in der Aufnahme von Trag- und Führungskräften des darauf fahrenden Fahrzeugs sowie in dem Ableiten dieser in den Untergrund. Die Schienen setzen sich aus Schienenkopf, -steg und -fuß zusammen, ihre genaue Geometrie ist durch [DIN EN 13674] definiert. In Abhängigkeit des Einsatzgebietes werden grundsätzlich zwei Schienenformen unterschieden:

- Vignolschienen, konische Schienenfahrfläche, Einsatzgebiete Fernverkehr, Nah-, Ortsverkehr,
- Rillenschienen, flache Schienenfahrfläche, Einsatzgebiet Ortsverkehr [THY12, GRO08].

Durch die breite Fläche des Schienenfußes neigt die Schiene nicht zum Kippen und kann mit Klammern und Schrauben an die Schwellen befestigt werden. Zur besseren Aufnahme von Querkräften, z. B. in den Schienenbögen, kann die Schiene durch geeignete Unterlagen geneigt eingebaut werden [LIC05].

Der Schienenstahl hat unter anderen Werkstoffen aufgrund der speziellen betriebsspezifischen Anforderungen an Schienen eine Sonderstellung [WAL91]. Schienenstähle stellen werkstofftechnisch eine Kombination aus der Zug- und Dauerfestigkeit, metallurgischen Reinheitsgrades sowie Korrosionsbeständigkeit dar [LIC05]. Zur Schienenherstellung können neun perlitische Stähle verwendet werden [DIN EN 13674]. Die chemischen Zusammensetzungen den meist verbreiteten Schienenstählen sind in Tabelle 2-1 dargestellt. Die eingesetzten Schienenstähle haben tendenziell eine perlitische Gefügebasis, wobei Mangan (Mn) die Rolle des Hauptlegierungselement einnimmt, und weisen eine Härte im Bereich 260 -

300 HBW auf. Somit können diese Werkstoffe der Gruppe von niedriglegierten ungehärteten Stählen zugeordnet werden. In der Literatur liegen zwar vereinzelt Erkenntnisse über die Bearbeitung der niedriglegierten Werkstoffe mit ähnlichem Härtegrad vor. Da jedoch solche Stähle eine andere, an explizite Anwendungsfälle angepasste Legierungsbildung aufweisen, sind ihre Eigenschaften wie die Wärmeleitfähigkeit, plastisches Verformungsvermögen, und somit die Zerspanbarkeit, mit diesen der Schienenstähle nicht zu vergleichen.

Die Vorschriften über die Werkstoffgüte, die Fertigung und die Abnahmebedingungen sind in den Vorschriften des Internationalen Eisenbahnverbandes UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER (UIC) festgelegt [THY12, HAN52]. Die Herstellung von Schienen erfolgt durch das Warmwalzen. Das Rohling wird bei der Temperatur $T \approx 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ zunächst mit Flachwalzen auf eine Länge von $l \approx 120 \text{ m}$ gebracht, woraufhin die Form in mehreren Vorgängen durch das Profilwalzen eingepreßt wird. Abschließend wird der Strang nach dem Abkühlen gerichtet und bei einigen Schienenspezifikationen der Schienenkopf gehärtet. Am Werk können die Schienen zu Segmenten mit Längen $l \leq 500 \text{ m}$ zwecks Herstellung hoher Geradheit verschweißt werden [FIE05]. Die aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet der Schienenstähle gehen in Richtung der Verbesserung ihrer Einseitzigenschaften durch den Einsatz innovativer Legierungszusammensetzungen sowie gezielter Wärmebehandlung. Angestrebt wird die Ausbildung eines feinen Perlitgefüges, das durch eine Abkühlung aus der Walzhitze erzielt werden kann [DEY11, WAL91].

Tabelle 2-1: Zusammensetzung der Schienenstähle [DEY11, FEN06, DIN EN 13674]

Stahl	Chemische Zusammensetzung der Legierungselemente [%]					Wärmebehandlung
	C	Si	Mn	P	S	
R200	0,40 - 0,60	0,15 - 0,58	0,70 - 1,20	$\leq 0,035$	$\leq 0,035$	nein
R260	0,62 - 0,80	0,15 - 0,58	0,70 - 1,20	$\leq 0,025$	$\leq 0,025$	nein
R320Cr	0,60 - 0,80	0,50 - 1,10	0,80 - 1,20	$\leq 0,020$	$\leq 0,025$	ja
R350HT	0,72 - 0,80	0,15 - 0,58	0,70 - 1,20	$\leq 0,020$	$\leq 0,025$	ja
R400HT	0,90 - 1,05	0,20 - 0,60	1,00 - 1,30	$\leq 0,020$	$\leq 0,020$	ja

2.1.2 Rad/Schiene-Kontakt

Das Zusammenspiel des Eisenbahnrades mit der Schiene führt zum Rad/Schiene-Kontakt, dessen Hauptaufgaben die Gewährleistung der Trag- und Führungsfunktion sowie die Übertragung von Antriebs- und Bremskräften sind. Dabei beträgt die Kontaktfläche $A_g \approx 1 \text{ cm}^2$, die entstehende Kontaktsituation ist in Bild 2-1 schematisch dargestellt. Im Allgemeinen kommt es zu einer Einpunktberührung zwischen der Radlaufläche und Schienenfahrfläche; bei Bogenfahrten oder Querverschiebungen kommen Mehrpunktberührungen zur Stande, wodurch zusätzliche Belastungen eingebracht werden können. Die Aufnahme großer Kräfte ist im Kontaktpunkt zwischen dem Rad und der Schiene nur in Richtung der Kontaktnormalen möglich. Mit Vergrößerung der Radkonizität erfolgt eine Steigerung der waagerechten Kraftkomponente, die auch außerhalb von Kurven wirkt. Durch das Einwirken des Rades wird die Schiene durch folgende Kräfte beansprucht [WIL08, ERT03, KNO01]:

- Normalkraft N , die sich im Idealfall aus der Gewichtskraft, die auf das Rad wirkt, ergibt. Bei konischen Profilen ergibt sich zusätzlich eine horizontale Kraftkomponente, die die Spurführungskräfte beinhaltet.
- Tangentialkraft T_ξ , die ausschließlich Antriebs- und Bremskräfte beinhaltet.
- Lateralkraft T_η ist die Querkraft, die beim Kontakt des Radspurkranzes mit der Kopfseite der Schiene entsteht und das Fahrzeug in der Spur hält.

Bei einer Bewegung des Rades auf der Schiene treten Tangentialkräfte T_ξ und Relativbewegungen zwischen den Kontaktpartnern auf. Daraus entstehende Spannungen und Materialverschiebungen werden zum Tangentialkontaktproblem gezählt. Das Normal- und das Tangentialkontaktproblem verursacht somit eine Gleitbewegung zwischen Rad und Schiene, die zum kinematisch reinen Rollen hinzukommt und dessen Ausprägung von der wirkenden Normalkraft und der Rollgeschwindigkeit abhängt. Dieser Vorgang wird Schlupf genannt. Grundsätzlich werden folgende drei Arten von Schlupf unterschieden [SCH10, TAP05, POP03, KNO01]:

- Längsschlupf v_ξ , der durch Ungleichheiten zwischen Umfangsgeschwindigkeit und translatorischer Geschwindigkeit entlang der Fahrtrichtung verursacht wird.
- Querschlupf v_η , der das Verschieben des Radsatzes auf der Schienenebene beschreibt. Da das Rad keine große translatorische Bewegung quer zur Schiene erfährt, tritt auch kaum Gleiten in dieser Ebene auf, sodass der Querschlupf tendenziell vernachlässigt wird.
- Bohrschlupf v_ζ , der durch das Bohrmoment M_ζ hervorgerufen wird, das in der Ebene des Radkontakts zwischen Rad und Schiene stattfindet. Die direkten Folgen des Bohrschlupfes v_ζ sind Materialermüdung und Verschleiß.

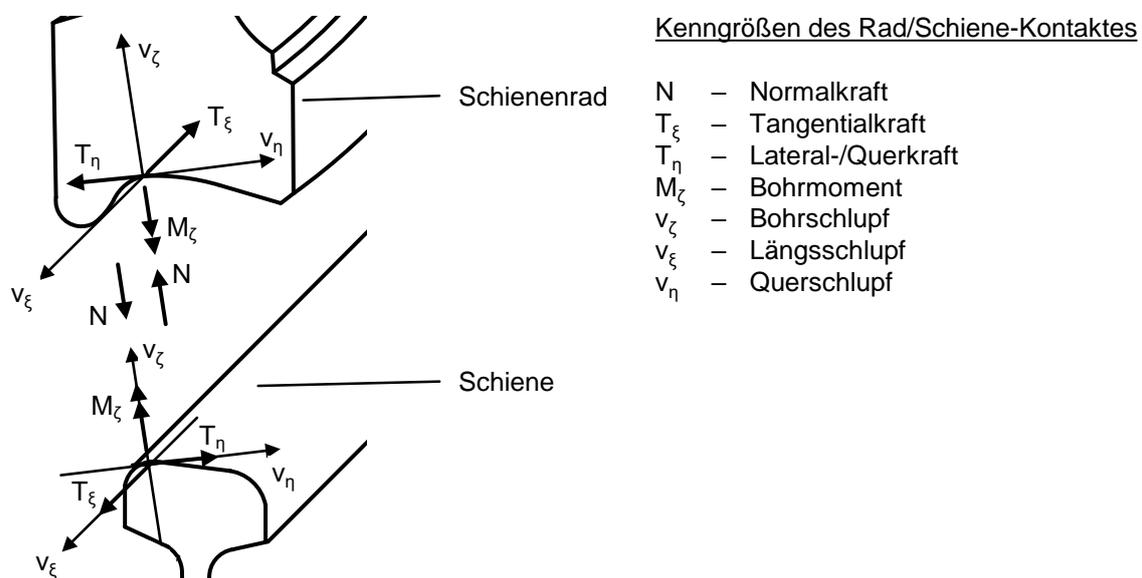


Bild 2-1: Kinematik der Kräfte und Schlüpfe im Rad/Schiene-Kontakt [ERT03]

Das Abrollverhalten des Rades in den geraden Schienen und den Schienenbögen unterscheidet sich deutlich. Im geraden Gleis ist ein Sinuslauf vorhanden, den KLINGEL [KLI83] und KNOTHE [KNO03b] ausführlich beschreiben. Die Haupteinflussfaktoren auf das Einsatz-

verhalten der Schiene in den Bögen sind der Bogenradius r_K sowie der Achsabstand l_A . Bei den Bogenfahrten gilt grundsätzlich, dass der Radkranz sich in einem konstanten lateralen Kontakt mit der Kopfseite / -kante der hohen/äußeren Schiene befindet. Dadurch kommt kein Sinuslauf zustande und die hohe/äußere Schiene wird wesentlich intensiver verschlissen als die niedrige / innere Schiene. Bei einer detaillierten Betrachtung der Kontaktverhältnisse einer Bogenfahrt soll eine Differenzierung der Bogenradien vorgenommen werden [SCH10]. Bei einem Bogenradius $r_K > 750$ m aufgrund der dominierenden Tangentialkräfte kontaktiert ausschließlich der Vorderradsatz mit der Kopfseite/Fahrkante der Schiene, wobei nur geringe Lateralkräfte T_η erzeugt werden. Der Kontakt in lateraler Richtung ist dabei nicht konstant. Bei den Bogenradien $450 \text{ m} \leq r_K \leq 750 \text{ m}$ erfolgt eine kontinuierliche Steigerung der Kontaktintensität in lateraler Richtung und Senkung der Tangentialkräfte. Für die Bogenradien $r_K \leq 450 \text{ m}$ ist der Einfluss der Lateralkraft T_η auf das Fahrverhalten größer als dieser der Tangentialkraft T_ξ .

Die ersten wissenschaftlichen Arbeiten zur Berechnung des Rad/Schiene-Kontaktes stammen von HERTZ [HER81], dessen Theorie darauf beruht, dass zwischen zusammengepressten elastischen Körpern mit gewölbter Oberfläche (Ebenen 2 Ordnung) Kontaktflächen mit elliptischer Form entstehen, wobei die Spannung stets in der Mitte maximal ist. Für zwei parallel liegende gepresste Zylinder ergibt sich ein Rechteck, die maximalen Spannungen liegen auf der Mittellinie entlang der Zylinder. Für die Sonderfälle Kugel/Ebene und Zylinder/Ebene wird der jeweilige Radius des ebenen Halbraumes unendlich groß gewählt [SCM10, HER81]. SNEDDON [SNE65] erweiterte die Hertz'sche Theorie, um Belastungen berechnen zu können, die durch beliebige Rotationskörper hervorgerufen werden. CARTER [CAR26] stellte fest, dass beim Abrollen von Gummiwalzen auch bei kleinen Antriebs- und Bremsmomenten Differenzen zwischen Translations- und Rotationsgeschwindigkeit auftreten, die proportional mit dem Moment steigen. Dies geschieht durch den sogenannten Mikroschlupf, der durch die Elastizität der Werkstoffe auftritt. Bei einer detaillierten Betrachtung der Haftzone in der Kontaktfläche ist ersichtlich, dass die tatsächliche Kontaktfläche wesentlich kleiner ist als die theoretische. BOWDEN UND TABOR [BOW59] stellten fest, dass zwei Körper in der Haftzone unterschiedliche Abstände voneinander haben. In manchen Bereichen ist der Abstand so gering, dass interatomare Kräfte wirken: Die Stoffe binden sich dort zu Kontaktbrücken, deren Gesamtfläche die tatsächliche Kontaktfläche ergibt. Sie lässt sich durch die Annahme abschätzen, dass alle Mikrokontakte plastisch deformiert werden. Damit gleicht die Normalspannung σ der Eindruckhärte H des Materials und die reale Kontaktfläche ergibt sich somit aus der Normalkraft N und der Normalspannung σ , Formel 2-1. Die Haftreibung ergibt sich daraus, dass die entstandenen Brücken, bzw. die tatsächliche Kontaktfläche gesichert werden müssen, und dazu die Tangentialspannung T_ξ , bzw. Scherfestigkeit τ erforderlich ist, Formel 2-2. Die oben beschriebene Methode wird häufig für die numerische Modellierung des Rad/Schiene-Kontaktes eingesetzt und wird nichtlineare exakte Kontakttheorie genannt. Bei gleichen Grundannahmen wie bei dieser Methode kann vereinfachend angenommen werden, dass die Tangentialspannungen T_ξ linear von der tangentialen Verschiebung des Materials abhängen. Darin liegt das Grundkonzept der sogenannten linearen Kontakttheorie. Diese Theorie ist für kleine Schlupfwerte, wie sie im Fernverkehr auftreten, ausreichend und analytisch lösbar [POP03].

$$A = \frac{N}{\sigma} \quad (2-1)$$

$$A = \frac{T_{\xi}}{T} \quad (2-2)$$

2.1.3 Schienenverschleiß

Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen wie beispielsweise Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers [GFT02]. Unter Verschleißmechanismen werden die beim Verschleißvorgang ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse verstanden. Die hauptsächlichen Verschleißmechanismen sind Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung (Ermüdung) und die Tribochemische Reaktion (Tribooxidation). Das Zusammenwirken aller am Verschleißvorgang beteiligten Teile einer Konstruktion bildet das tribologische System (Tribosystem). Die auf Elemente eines Tribosystems von außen einwirkenden Beanspruchungsgrößen bilden das Beanspruchungskollektiv. Der Verschleiß wird durch die Verschleißkenngrößen beschrieben, die Längen-, Flächen oder Massenänderung des zu verschleißenden Körpers liefern. Die technisch-physikalischen Beanspruchungsparameter bei einem Verschleißvorgang sind Normalkraft N , Geschwindigkeit v , Temperatur T und Beanspruchungsdauer t_B [GEB15, GFT02].

Wie viele andere metallische Bauteile sind die Schienen empfindlich zur zyklischen Belastung, die eine Ermüdung des Materials hervorruft. Beim Rad/Schiene-Kontakt treten mehrere Faktoren kombiniert auf, die eine Verschleiß- und Fehlerentwicklung begünstigen: Systembedingtes Fehlen einer Schmierung, inkonstante Belastungsbedingungen, Brems- und Beschleunigungsvorgänge, Anwesenheit von Fremdpartikeln sowie Makro- und Mikroschlupf der Räder in den Bögen. Die auftretenden Belastungen setzen sich aus statischen Radlasten, die bis 100 kN betragen können, dynamischen Radlasten und dynamischen Antriebs- und Bremskräften von ca. 40 kN sowie von lateralen Kräften von ca. 20 kN zusammen [EGL04]. Die sämtlichen Verschleißarten von Schienen sind in den Normen spezifiziert, wobei für die jeweiligen Verschleißarten die zulässigen Grenzwerte definiert sind. Einen Überblick über die Schienenfehler geben unter anderem CANNON ET. AL. [CAN03] und KALOUSEK [KAL97]. Eines der wichtigsten Einflussfaktoren auf die auftretenden Verschleißmechanismen ist der Bogenradius r_K , was durch die im Kapitel 2.2.2 dargelegten Unterschiede in Kontaktintensitäten und -kräften verursacht wird. Der Bogenradius r_K ist daher entscheidend, ob der adhäsive Verschleiß bzw. die Rollkontaktermüdung der vorherrschende Verschleißmechanismus ist. Die direkte Folge des Schienenverschleißes ist die Notwendigkeit der Schienenreparatur bzw. des -austausches. Im Folgenden werden die wesentlichen Arten des Schienenverschleißes einzeln beschrieben.

Adhäsiver Schienenverschleiß

Der kontinuierliche Reibungskontakt zwischen dem Radkranz und der Schienenkopfkante/-fahrfläche in lateraler Richtung verursacht die Abnahme der Werkstoffmikrobereiche, was einen klassischen Fall des adhäsiven Verschleißes darstellt. Die Reibungsmechanismen, die zu dieser Verschleißart führen, sind durch CZIHOS [CZI92], POPP [POP03] und WILD [WIL08] beschrieben. Schienenverschleiß tritt hauptsächlich auf den geraden Schienen oder in den Schienenbögen mit einem Bogenradius $r_K > 750$ m auf. Beim adhäsiven Schienenverschleiß kommt es zunächst zu Einschnürungen und Rissen im Kontaktbereich, und danach zu Abscherungen und wechselseitigem Materialübertrag. Durch die im Kontaktbereich auftretenden

den Reibungsmechanismen werden einzelne Mikrokontakte induziert, deren Anzahl proportional mit der Belastung in Form der Normalkraft N zunimmt. Die Mikrostruktur der Randzone wird dabei stark verändert. Die maximale Ausdehnung plastisch verformter Bereiche beträgt ca. 100 μm in den Schienenkopf hinein. Im Bereich der flach verlaufenden Verformungsspuren finden eine deutliche Kornverfeinerung sowie eine Neuorientierung und Streckung der einzelnen Phasen statt. Die Mikrohärtigkeit steigt vom Schienenkopfinnenen bis an die Fahrfläche um den Faktor 2 oder mehr an.

Schienenverschleiß durch Rollkontaktermüdung

Die Ursache der Rollkontaktermüdung, auch rolling contact fatigue (RCF) genannt, ist der Zweipunktkontakt zwischen dem Rad und der Fahrkante. Die Lage der Kontaktellipsen variiert in Abhängigkeit der tatsächlichen Profile von Rad und Schiene. Die Kontaktfläche ändert sich mit der Radlast P_r . Bei einer zyklischen Schienenbelastung entstehen Spannungen, die sich aus der Normalkraft N sowie dem durch die Bogenfahrt entstehenden Schlupf zusammensetzen. Die langfristige Folge solch einer Belastungssituation ist die Materialermüdung, insbesondere im Fahrkantenbereich der Schiene. Die Entwicklung der Rollkontaktermüdung kann in folgende Phasen unterteilt werden, Bild 2-2 [EKB14, TAP05, JOH85a]:

- Rein elastische Beanspruchung; die Fließgrenze wird nicht erreicht; der Vorgang ist reversibel; ohne Belastung kehrt das Material in seine Ausgangsform zurück.
- Elastischer shakedown; Kaltverfestigung; elastische Dehnung in den erweiterten Spannungsgrenzen.
- Plastischer shakedown; zyklische Plastizität; ständiger Materialfluss verursacht lokale plastische Ermüdungen, sogenannter low cycle fatigue.
- Bruch / Rissbildung, auch ratchetting; erfolgt infolge der weiteren Akkumulation der Bauteilspannungen.

Die direkte Folge der Rollkontaktermüdung sind die Ermüdungsrisse, auch head checks genannt. Nach derzeitigem wissenschaftlichem Stand der Erkenntnisse besitzen Ermüdungsrisse die höchste Bedeutung von allen Schienenverschleißarten mit dem Blick auf die Schienenhaltungskosten (life cycle costs, LCC). Die Ermüdungsrisse treten häufig im Bereich der Fahrkante von den Außenschienen mit dem Bogenradius $r_K = 400 - 1200 \text{ m}$ auf. Der Entstehungsort von Ermüdungsrissen ist nahe der Fahrkante, dort wo die Verformungsspuren unter einem kritischen Winkel von mindestens $\alpha = 13^\circ$ zur Lauffläche verlaufen. Sie verlaufen entlang der Spuren plastischer Verformung innerhalb einer plastisch hochverformten Schicht mit einer Tiefe von $z = 200 \mu\text{m}$. Der mittlere Abstand von Riss zu Riss beträgt bei naturhaftem perlitischem Gefüge etwa 1 bis 2 mm und kann sich bei kopfgehärteten Schienen bis auf 0,8 mm verringern. Wächst der Riss über die dünne plastisch verformte Schicht hinaus, kann er von seiner ursprünglichen Richtung ca. 30° von der Oberfläche abknicken und sich nahezu vertikal ausbreiten [TAP05, POP03]. Mit zunehmender Risstiefe besteht die Gefahr von Ausbröckelungen bis hin zur Änderung der Wachstumsrichtung in die Querschnittsebene, was zu einem Schienenbruch führen kann. BERNSTEINER ET AL. [BER15] wiesen darauf hin, dass die Rollkontaktermüdung im geraden Gleis zu Ausbildung von weißen Schichten (white etching layers, WEL) mit einer Tiefe von bis zu $z = 20 \mu\text{m}$ und einer martensitischen Struktur führen kann. BAUMANN [BAU98] hat weiterhin die Struktur der weißen Schichten auf Schienen untersucht. Er stellte fest, dass diese aus einem nanokristallinen Gefüge mit

Korngrößen 20 nm besteht. Die vormals im perlitischen Grundwerkstoff vorhandenen Karbide sind aufgelöst, die Struktur der weißen Schicht ist inhomogen. Die WEL werden unter Einwirkung der Temperaturen um $T = 600\text{ °C}$ gebildet. Der verantwortliche Prozess zur Schichtbildung ist dabei der des mechanischen Legierens in der Oberfläche.

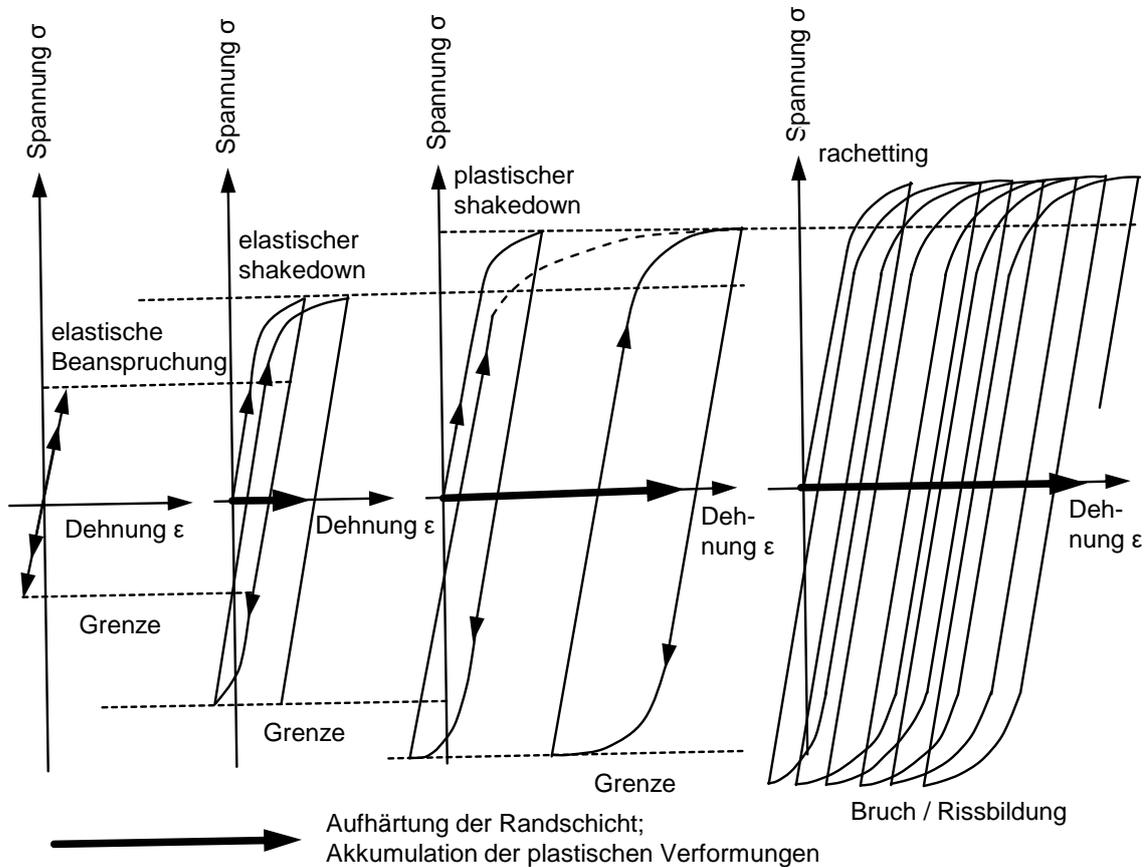


Bild 2-2: Entwicklung der Rollkontaktermüdung in den Schienen

Außer der beiden genannten sind weitere Schienenverschleißarten bekannt, wie beispielsweise Riffel, squats, Eindrückungen, Schlupfwellen, Schleuderstellen, belgrospi's usw., die jedoch tendenziell von lokaler Relevanz sind. Zudem sind diese nahezu vollständig hinsichtlich der Ursachen und Geometrie erforscht [DEY09, FEN07, REI07, CAN03, HOC00].

Die Betrachtung des Schienenverschleißes beruht grundsätzlich auf der Annahme der homogenen Materialbeschaffenheit entlang des Schienenprofils im Ausgangszustand. Diese Annahme trifft allerdings ausschließlich für die neu verlegten Schienen zu. Im Falle der instandgesetzten Schienen, beispielsweise nach einem Reparaturvorgang durch Schleifen, Schweißen oder Fräsen, liegen aufgrund thermischer Einwirkung jedoch bereits im Ausgangszustand veränderte Beschaffenheiten der obigen Randzonenschichten vor. Der Zusammenhang dieser veränderten Schienenrandzonen mit dem nachfolgenden Schienenverschleiß ist nach derzeitigem Stand der Erkenntnisse kaum erforscht.

2.1.4 Erkenntnisse und Ansätze zur Analyse des Einsatzverhaltens von Schienen

Der Literatur können zahlreiche Arbeiten zur tribologischen Analyse des Reibungs- und Verschleißverhaltens von metallischen Werkstoffen entnommen werden. POINTER ET AL. [PON85] und JONES ET AL. [JON97] machten eine Empfehlung zur Bestimmung von nicht bekannten Scherfließgrenze K und von Mises Kriteriums. TYFOUR ET AL. [TYF95] untersuchten das Verschleißverhalten von perlitischem Stahl im ratchetting-Regime. In einer weiteren Veröffentlichung wird der Einfluss der Witterung (trocken und regennasse Schiene) auf die Rollkontaktermüdung untersucht [TYF96]. BOWER UND JOHNSON [BOW91] entwickelten ein einfaches nichtlineares kinematisches Verfestigungsgesetz, die notwendigen Parameter dafür ermitteln sie aus den Zug-Druck-Versuchen unter Mittelspannung. BOWER [BOW89] führte Belastungsversuche unter nicht-proportionaler Zug-Druck-Torsionsbelastung an Kupfer und BS11-Schienenstahl durch. STADLBAUER [STA01] untersuchte Stähle mit unterschiedlichen Legierung- und Wärmebehandlungskonzepten im Hinblick auf ihr zyklisches Ver- und Entfestigungsverhalten. Dabei wurde eine zyklische Abnahme der neu akkumulierten plastischen Scherdehnung festgestellt. Zur Prüfung von Schienenstählen wird häufig ein nicht proportionaler Lastzyklus herangezogen, wobei die während der Überrollung auftretende Spannungskomponente σ_x welche aus der Traktion resultiert, und die Spannungen τ_{xz} , berücksichtigt werden [STA01, KAP94, BOW89]. Einen Überblick über die vorhandenen Arbeiten zur experimentellen Analyse zyklischer Belastung im Rad/Schiene-Kontakt gab TAPP [TAP05]. Grundsätzlich werden dabei drei Konzepte des Versuchsaufbaus, Scheibe/Scheibe, Rad/Scheibe und Rad/Schiene, unterschieden.

2.2 Schleifen mit rotierenden Werkzeugen

2.2.1 Grundlagen

Das Schleifen mit rotierenden Werkzeugen ist durch die [DIN 8589] als spanendes Fertigungsverfahren mit vielschneidigen Werkzeugen definiert, bei dem die geometrisch unbestimmten Schneiden von einer Vielzahl gebundener Schleifkörner aus natürlichen oder synthetischen Schleifmitteln gebildet sind. Die Schleifverfahren lassen sich dabei nach Art der Bewegung in das Längs-, Quer-, Freiform- und Nachformschleifen, nach der Wirkfläche am Werkzeug in das Umfangs- und Seitenschleifen sowie nach der Art der zu erzeugenden Fläche in das Plan-, Rund-, Schraub-, Wälz-, Profil- und Formschleifen aufteilen. Zusätzlich in Abhängigkeit wird zwischen dem Pendelschleifen und dem Tiefschleifen unterschieden. Beim Tiefschleifen wird die Endform des Werkstückes mit hohen Zustellungen a_e , oft in einem Überschliff und mit herabgesetzten Vorschubgeschwindigkeiten v_f erzielt, während beim Pendelschleifen das Material während mehrerer Überschliffe, tendenziell mit geringen Zustellungen a_e und hohen Vorschubgeschwindigkeiten v_f abgetrennt wird.

Die wesentlichen Zusammenhänge zwischen den Prozessstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s , Zustellung a_e und Vorschubgeschwindigkeit v_f , Prozesskennwerten wie Normal- F_n und Tangentialschleifkräfte F_t sowie mit den Bearbeitungsergebnissen in Form von den Rauheiten sind für das Längs-Umfangs-Planschleifen der metallischen Werkstoffe bekannt und beispielsweise durch KLOCKE [KLO82] und UHLMANN [UHL94] beschrieben.

Die konventionellen Schleifkörper setzen sich aus Schleifkörnern, Bindung und Poren zusammen. Hierbei ist zu beachten, dass zur Gewährleistung der Spanbildung der Kornwerkstoff eine wesentlich höhere Härte, als das zu zerspanende Material aufweisen soll. Zur Beschreibung der Produktivität der Schleifbearbeitung wird üblicherweise der Kennwert bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_W herangezogen, das von die Vorschubgeschwindigkeit v_f und Zustellung a_e beinhaltet und anhand der Formel 2-3 berechnet werden kann. Das bezogene Zeitspannungsvolumen Q'_W charakterisiert das pro Zeit- t und Schleifbreiteneinheit a_p zerspannte Materialvolumen und wird oft zu Beschreibung der Wirtschaftlichkeit der Schleifbearbeitung herangezogen.

$$Q'_W = v_f \cdot a_e \quad (2-3)$$

2.2.2 Erkenntnisse zur Energie- und Wärmeentwicklung beim Schleifen

Die Auswirkung von Schleifprozessen auf die Bauteilrandzone ist seit über 30 Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Arbeiten. BRINKSMEIER [BRI82, BRI91] hat sich mit der Qualifizierung der durch das Schleifen erzeugten Randzonen beschäftigt. Als Einflussgrößen auf die mechanische und thermische Belastung beim Schleifen benennt er kinematische Eingriffsbedingungen bzw. Schleifverfahren, Maschinenstellgrößen, Zerspanbarkeit des Versuchswerkstoffes, Schleifscheibenspezifikation, Schleifscheibentopographie und Kühlschmierstoff. Des Weiteren werden die Möglichkeiten zur Beeinflussung der mechanischen und thermischen Belastung auf die Randzone beschrieben und drei Indikatoren vorgeschlagen, die zur ganzheitlichen Beschreibung der Bauteilrandzone herangezogen werden können: Der Eigenspannungszustand, die Mikrohärtigkeit sowie die Gefügebeschaffenheit. Das Maß der thermischen Randzonenveränderung ist zum großen Teil von den Schleifprozesskennwerten wie die bezogene Schleifnormal- F'_n , Formel 2-4, und Schleiftangentialkraft F'_t , Formel 2-5, Schleifkontaktfläche A_g , Formel 2-6, und Schleifleistung P_c , Formel 2-7, abhängig. BRINKSMEIER [BRI82, BRI91] definiert die Kenngrößen kontaktfächenbezogene Schleifleistung P''_c , Formel 2-8, bezogene Schleifenergie E''_c , Formel 2-9, sowie spezifische Schleifenergie e_c , Formel 2-10, die aus diesen Schleifkennwerten abgeleitet und mit dem Maß der Randzonenveränderung korrelieren können.

$$F'_n = \frac{F_n}{a_p} \quad (2-4)$$

$$F'_t = \frac{F_t}{a_p} \quad (2-5)$$

$$A_g = l_g \cdot a_p \quad (2-6)$$

$$P_c = F_t \cdot v_c \quad (2-7)$$

$$P''_c = \frac{P_c}{A_g} = \frac{F_t \cdot v_c}{l_g \cdot a_p} = \frac{F'_t \cdot v_c}{l_g} \quad (2-8)$$

$$E''_c = P''_c \cdot \Delta t = \frac{F'_t \cdot v_c}{v_f} \quad (2-9)$$

$$e_c = \frac{P''_c \cdot \Delta t}{a_e} = \frac{F'_t \cdot v_c}{Q'_W} \quad (2-10)$$

Der Einfluss der Schleifstellgrößen Umfangs- v_s und Vorschubgeschwindigkeit v_f , auf die Randzonenbeschaffenheit der metallischen Bauteile wurde in mehreren wissenschaftlichen Arbeiten analytisch und experimentell untersucht. Den Literaturquellen [WIL08, ZEP05, WER97, BRI91, TAW90, LOW80, KOE77, DED72, GUE67] kann entnommen werden, dass eine Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit v_s in der Regel eine erhöhte Wärmeeinbringung aufgrund der Steigerung der Schleifleistung P_c verursacht. Im Gegensatz dazu werden bei steigenden Vorschubgeschwindigkeiten v_f tendenziell abnehmende Kontaktzonen Temperaturen beim Schleifen T_{kz} und eine geringere Wärmeeinbringung festgestellt. WILKE [WIL08] fokussiert in seiner Arbeit mögliche Zustände der Randzonen nach dem Schleifen, die oft in Form von Anlass- und Neuhärtezonen vorliegen. Deren Ausbildung beschreibt er durch eine in der Kontaktzone stattfindende Umwandlung des Martensits in Austenit und Ferrit, welche durch hohe Temperaturen verursacht wird. HÖHN [HOE06], SCHWIENBACHER [SCH08a] und GORGELS [GOR11] analysierten in ihren Arbeiten den Einfluss der durch das Schleifen in unterschiedlichem Maße beeinflussten Randzonen auf das Einsatzverhalten unter Betriebsbelastung. Hierbei kam GORGELS [GOR11] zum Schluss, dass das Einsatzverhalten nach dem Erreichen eines bestimmten Zustandes der Veränderung sich erheblich verschlechtert. Die Veränderung kann dabei in Form der Bauteilhärte bzw. der Eigenspannungen charakterisiert werden. GORGELS [GOR11] definierte diesen Zustand als Schädigungsgrenze und empfiehlt, dass bei der Auslegung von Schleifprozessen u. a. diese Kenngröße mitberücksichtigt werden soll. Nach BRINKSMEIER [BRI94] ist eine Einstellung der Randzoneneigenschaften durch eine gezielte Ausbildung der martensitischen Randschichtstruktur mittels Schleifen möglich, so genanntes Schleifhärten. Durch ein erfolgreiches Schleifhärten werden die auf die Einseitzigenschaften positiv auswirkende Druckeigenspannungen in der Randzone gebildet; hierbei soll auf eine sinnvolle Kombination aus der thermischen Wirkung und der Wärmeeinwirkzeit geachtet werden. Als Kennwerte bzw. Indikatoren werden die Schleifleistung P_c und die Kontaktzonen Temperatur T_{kz} betrachtet [BRI10]. Untersucht ist sowohl die Einstellung von Anlass- und Neuhärtezonen bei dem konventionellen Längs-Umfangs-Planschleifen [WEB02, BRI04], als auch bei dem Hochgeschwindigkeitsschleifen [BRI04, MIN04, WEB02, BRI93]. Weiterhin entwickelte BRINKSMEIER [BRI16] die Zeit-Temperatur-Diagramme zur Vorhersage der Randzoneneigenschaften nach dem Schleifen. In Bild 2-3 ist ein solches Diagramm für den Werkstoff 90MnCrV8 gezeigt. Es fällt auf, dass die bekannten ZTA/ZTU-Diagramme aus dem Gebiet der Wärmebehandlung für die Schleifbearbeitung nicht gänzlich anwendbar sind. Dies kann vermutlich auf den Einfluss der mechanischen Spanabtrennung auf die werkstofftechnischen Vorgänge in der Werkstückrandzone zurückgeführt werden [BRI16].

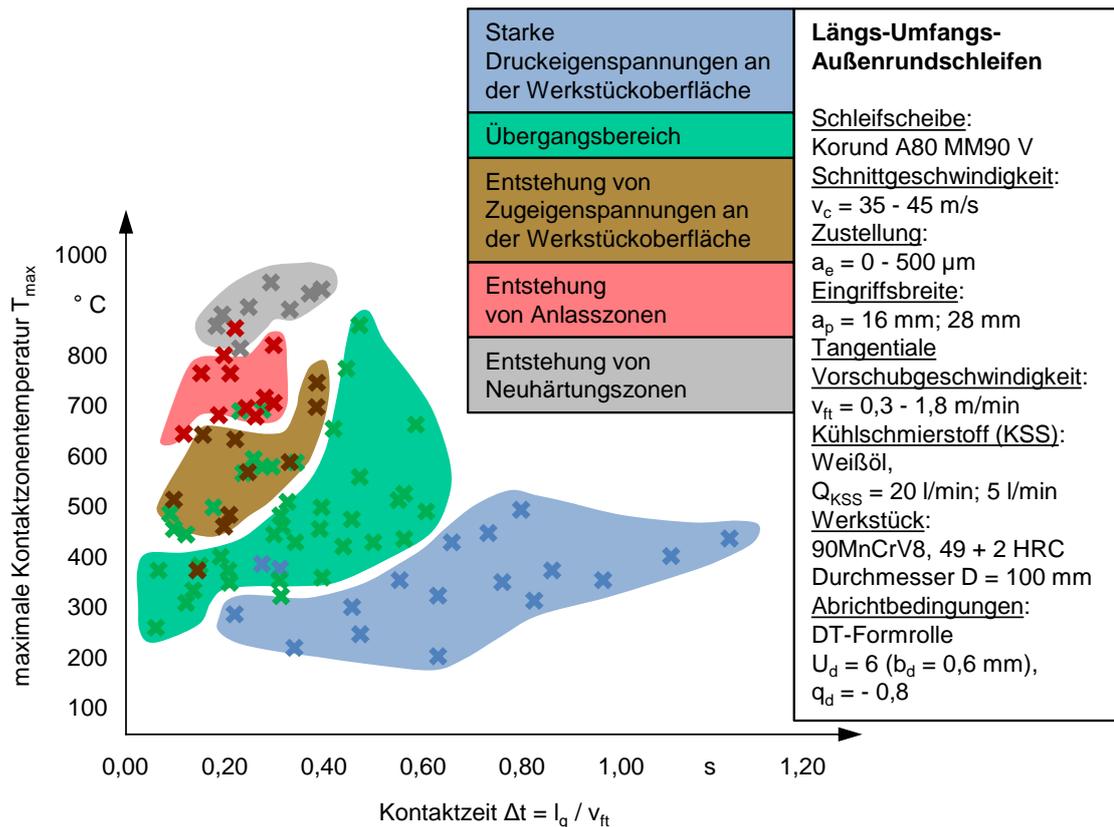


Bild 2-3: Einfluss der Schleifstellgrößen auf die Randzonenbeschaffenheit beim Längs-Umfangs-Außenrundschleifen des Werkstoffes 90MnCrV8 [BRI16]

2.2.3 Erkenntnisse zur Schleifbearbeitung von temperierten Werkstücken

Über die Schleifbearbeitung von temperierten Werkstücken liegen nur wenige vereinzelte Erkenntnisse vor. CHOI ET AL. [CHO04] analysierten den Einfluss von auf eine Temperatur von $T = -30 \text{ °C}$ gekühlten Kühlschmierstoffes auf die Bearbeitungsergebnisse und verglichen diese mit der Bearbeitung unter der Zufuhr der kalten Luft. Hierbei wurde festgestellt, dass der gekühlte Schmierstoff einen geringeren Einfluss auf die Veränderung des Randzonenzustandes hat.

2.2.4 Erkenntnisse zum Einfluss von Schmiermengen auf die Prozess- kenngrößen und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schleifen

In den meisten Tiefschleifprozessen mit hohen Zeitspannungsvolumina werden Kühlschmierstoffe eingesetzt. Deren Aufgabe ist es die Reibung im Schleifkontakt zu reduzieren, die Späne anzuführen, sowie das Werkstück, das Werkzeug und die Werkzeugmaschine zu kühlen [HEY14, GRA01]. Im Bereich des Längs-Umfangs-Planschleifens mit rotierenden Werkzeugen liegt der Fokus derzeitiger Forschungsarbeiten auf der Untersuchung des Einflusses des Volumenstroms auf die Trennleistung und Bearbeitungsergebnisse. Hierbei besteht weiterhin das Ziel, eine gleichmäßige Strömung sicherzustellen und den Schmierstoff möglichst stark zu beschleunigen. In den weiteren Forschungsarbeiten werden unterschiedliche Düsenformen hinsichtlich der Beeinflussung des Volumenstromes und der Eignung für konkrete Anwendungen analysiert. Grundsätzlich können drei Kühlschmierstoffszenerarien genannt werden, die beim Schleifen eingesetzt werden können:

- Trockenschleifen,
- Schleifen mit der Minimalmengenschmierung,
- Schleifen unter Verwendung der Überflutungskühlung mit definiertem Volumenstrom.

Nach TAWAKOLI UND RABIEY [TAW08] wird das Trockenschleifen, auch Trockenbearbeitung genannt, grundsätzlich bei Anwendungen mit hohen Zeitspannungsvolumina und geringen thermischen Randzonenveränderungen eingesetzt. Da die Reibungswärme bei einem Schleifvorgang maßgeblich die Wärmeentwicklung beeinflusst, soll sich beim Trockenschleifen die statistische Schneidenzahl S'_{stat} , an die dynamische Schneidenzahl S'_{dyn} , angenähert werden. VOLL [VOL00] gibt an, dass insbesondere bei den Anwendungen wie die Edelstahlbearbeitung sowie Schleifen von Hartmetallwerkzeugen die Trockenbearbeitung weit verbreitet ist. KÖNIG [KOE94] stellte fest, dass beim trockenen Schleifen mit den CBN-Schleifwerkzeugen aufgrund des fehlenden Kühlmitteldrucks geringere Schleifnormalkräfte als bei der Nassbearbeitung erzeugt werden. TÖNSHOFF [TOE95] kam zur Erkenntnis, dass bei einer Trockenbearbeitung mit den Korund- und Sinterkorundscheifkörpern beim Innen-Rund-Querschleifen erhöhte Verschleißraten am Schleifwerkzeug und Gefügeschädigungen am Bauteil generiert werden können. Beim Innen-Rund-Längsschleifen von Wälzlagerringen zeigte KARPUSCHEWSKI [KAR95] erhöhte Prozesskräfte und erhöhten Verschleiß gegenüber dem Schleifen mit definiertem Volumenstrom bei der Kühlung auf. Die bisher aufgezählten Forschungsergebnisse wurden unter Verwendung von marktverfügbaren, für eine Trockenbearbeitung wenig angepassten, Schleifwerkzeugen generiert. DÜRR [DUE96], der für seine Forschungsarbeiten angepasste hochporöse Korundscheifkörper verwendete, erzielte eine verbesserte Wärmeabfuhr und niedrige Schleiftemperaturen. Durch den Einsatz der Minimalmengenschmierung (MMS) wird eine höhere Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit von Schleifprozessen angestrebt, vergleichbar zu dem Schleifen mit definiertem Volumenstrom. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass die geringen Kühlschmierstoffmengen zu Verbesserungen des Randzonenzustandes im Vergleich zu einer Trockenbearbeitung beitragen können. In der Literatur sind mehrere Forschungsarbeiten vorhanden, die sich einer Analyse der MMS widmen. SHAO ET AL. [SHA14] und SILVA ET AL. [SIL05] verglichen das MMS-Schleifen mit dem Schleifen unter normaler Überflutungskühlung (KSS-Zufuhr) sowie mit der Trockenbearbeitung. Beim Vergleich der Rauheitswerte nach der Trockenbearbeitung und der MMS-Bearbeitung für den Fall der Schleifbearbeitung von Stahl 4340, wurde eine positive Auswirkung der MMS festgestellt. LI ET AL. [Li08] kamen zum Ergebnis, dass durch die MMS eine höhere Intensität der Druckeigenstressungen im oberflächennahen Bereich generiert werden kann. TAWAKOLI ET AL. [TAW09, TAW10] haben Untersuchungen zur Analyse des Einflusses der MMS auf die Bearbeitungsergebnisse unter Variation von Prozess- und Kühlungsparametern und konnten feststellen, dass der MMS-Einsatz tendenziell vergleichbare oder bessere Bearbeitungsergebnisse liefert. SHAO UND LING [SHA14] stellten einen Berechnungsalgorithmus zur Kalkulation von Schleifkräften bei der Bearbeitung mit der MMS auf. BRINKSMEIER ET AL. [BRI16] entwickelten eine prozessgesteuerte KSS-Zufuhr zur Minimierung der thermischen Beanspruchung beim Schleifen.

2.2.5 Erkenntnisse zum Einfluss von Korundart und -anteil auf die Prozess- kenngrößen und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schleifen

LUDEWIG [LUD94] fasste die bis dato vorhandenen Erkenntnisse über den Einfluss konventioneller Schleifkörnung auf das Arbeitsergebnis beim Schleifen zusammen und untersuchte zusätzlich den Einfluss unterschiedlicher Arten konventioneller Schleifkörner, wie beispielsweise Edelkorund rosa, Einkristallkorund, Cubitron oder Zirkonkorund, auf die Prozesskräfte Normalkraft F_n und Tangentialkraft F_t sowie den Radialverschleiß Δr_s des Schleifwerkzeuges. Er konnte eine eindeutige Abhängigkeit der bezogenen Schleifkräfte F'_n und F'_t von dem Legierungsgrad des eingesetzten Kornwerkstoffes aufzeigen. MALKIN [MAL07] beschäftigt sich mit dem Einfluss der beim Schleifen mit unterschiedlichen Korundarten auftretenden thermischen Effekte auf die Randzonenveränderung. WANG [WAN03] stellte einen Modellierungsansatz zur Simulation der bei der Schleifbearbeitung mit den konventionellen Schneidstoffen messbaren Temperaturen auf.

Die Schleifscheiben mit dem Sinterkorundkorn haben gegenüber diesen aus reinem Schmelzkorund den Unterschied, dass aufgrund der werkstofftechnischen Eigenschaften des Sinterkorundes eine Erhöhung des Zeitspannungsvolumens bei gleich bleibender Bearbeitungsqualität erreicht werden kann. In den Sinterkorundscheiben betragen die Anteile des Sinterkorundes tendenziell zwischen 10 % und 50 %, den Rest stellt die Schmelzkorundphase zusammen. Durch einen Anteil von Sinterkorund über 50 % lassen keine nennenswerten Vorteile mehr erzielen. Anhand des derzeitigen Standes der Erkenntnisse lassen folgende Wirkmechanismen beim Einsatz von Sinterkorund nennen [UHL13a, ENG02, MUE02, BRU99, UHL97]:

- In Abhängigkeit der Kontaktzonen-temperatur Auftreten von duktilen bzw. spröden Verschleißmechanismen in Form von Mikrosplintern,
- Absplintern kleiner mikrokristalliner Partikel beim spröden Werkzeugverschleiß, während beim Einsatz des Schmelzkorundes größere Kornteile ausbrechen,
- Bei den duktilen Verschleißmechanismen werden auf den Kornschneiden die reibmindernden Schichten gebildet, die zur Verschleißreduktion beitragen.

2.2.6 Erkenntnisse und Ansätze zur Analyse von Spanbildungsmechanismen beim Schleifen

Zur Analyse von Spanbildungsmechanismen beim Schleifen wird meistens das Einkornritzen durchgeführt. Dabei wird das Einsatzverhalten eines Schleifkornes analysiert und anschließend auf die gesamte Schleifscheibe übertragen. Als Ergebnis des Einkornritzens können für konkrete Kombinationen von Schleifkorn und Werkstückwerkstoff Prozessparameter definiert werden, die eine duktile oder spröde Spanbildung verursachen. Die Voraussetzung für eine anwendungsgerechte Durchführung des Einkornritzens ist die Schaffung einer Lastsituation für das Ritzkorn, welche mit der Belastung des nachzubildenden Schleifkornes vergleichbar ist [DEN13, GIW03, LUD94]. Die Lastsituation kann hierbei anhand folgender Kenngrößen beschrieben werden:

- Maximale unverformte Spannungsdicke $h_{cu\ max}$,
- Kontaktlänge l_g ,

- Wechselwirkung mit anderen Schneiden im Werkzeugverbund, die u. a. anhand der Kenngrößen Bindungssteifigkeitskonstante, statische Schneidenzahl S'_{stat} , mittlerer Schneidenrundungsradius r_{sr} etc. charakterisiert wird.

Den Überblick über Ansätze und Möglichkeiten der Realisierung von Einkornritzversuchen gibt GIWERZEW [GIW03]. Hierbei stellen das Tauchritzen zusammen mit dem Längsritzen die meist verbreiteten Varianten des Einkornritzens dar. In Bild 2-4 sind die Kinematik und Kenngrößen des Tauchritzens gezeigt.

Das Längsversetzen des Kornes innerhalb des Längsversatzes Δx wird anhand der Formel 2-12 berechnet. Die die Kornbelastung charakterisierenden Kenngrößen maximale unverformte Spannungsdicke $h_{cu,max}$ und Kontaktlänge l_g werden anhand eines realen Schleifprozesses und einer tatsächlichen im Vorfeld vermessenen Schleifscheibentopographie bestimmt. Die Grundlagen zur Charakterisierung der Schleifscheibentopographie und Herleitung der Schleifscheiben Kenngrößen wie beispielsweise statische Schneidenzahl S'_{stat} und Spannungsdicke h_{cu} nach einer Topographievermessung wurden von LORTZ [LOR75] geschaffen. Die Bestimmung der Ritzstellgrößen Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} , Ritzvor-schubgeschwindigkeit v_{fr} und Ritzzustellung a_{er} erfolgt auf Basis der abzubildenden Schleifprozesse und der vermessenen Topographie der Schleifscheibe. Für das Einzelkorn auf einem Schleifscheibendurchmesser d_{kg} gelten Formel 2-13 und Formel 2-14. Mehrere Forschungsarbeiten zeigen auf, dass die Spanbildungsmechanismen beim Schleifen metallischer Werkstoffe insbesondere durch die Umfangsgeschwindigkeit v_s stark beeinflusst werden [GIW03, LUD94]. LUDEWIG [LUD94] und DENKENA ET AL. [DEN13], die Einkornritzversuche unter Verwendung relativ grober Schleifkornspezifikationen durchgeführt haben, konnten Ritzkräfte F_{nr} und F_{tr} im Bereich 2,5 - 200 N feststellen.

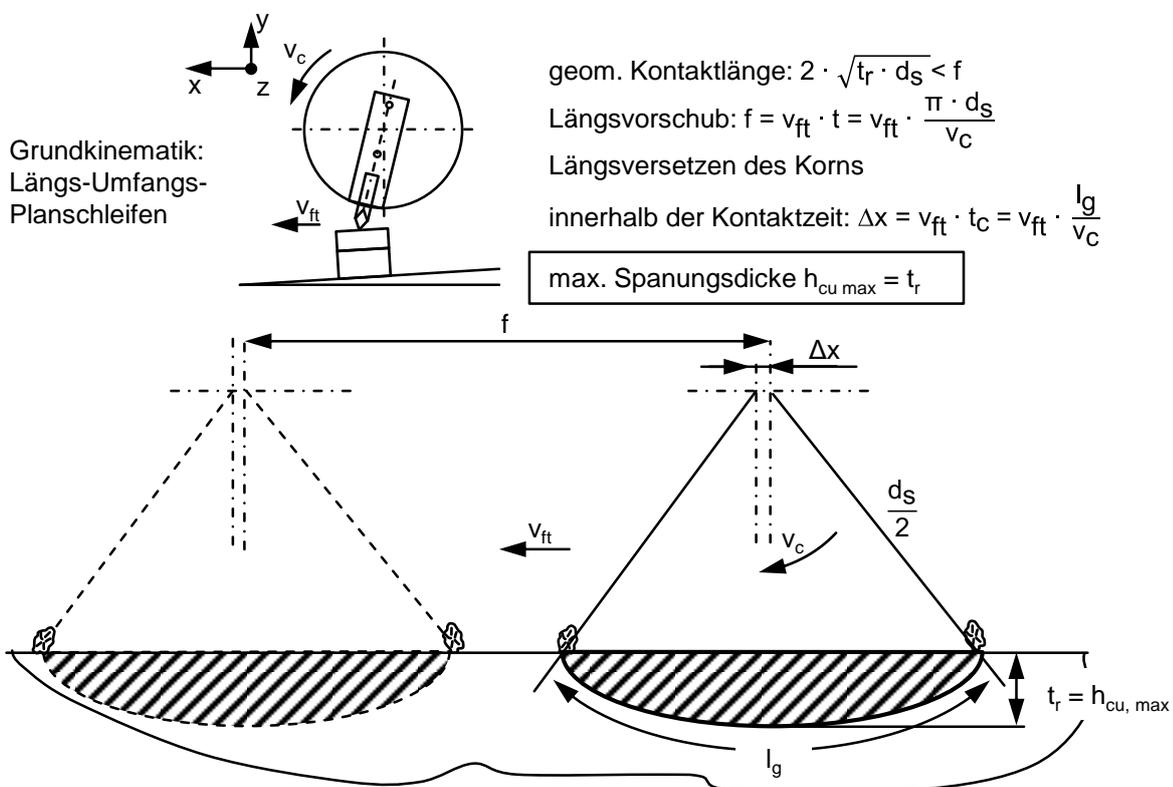


Bild 2-4: Kinematik des Tauchritzens nach GIWERZEW [GIW03]

$$\Delta x = v_{fr} \cdot \frac{l_g}{v_{sr}} \quad (2-12)$$

$$h_{cu} = 2 \cdot \pi \cdot d_{sr} \cdot \frac{v_{fr}}{v_{sr}} \cdot \sqrt{\frac{a_{er}}{d_{sr}}} \quad (2-13)$$

$$l_g = \sqrt{a_{er} \cdot d_{sr}} \quad (2-14)$$

Die Analyse der durch das Einkornritzen erzeugten Ritzspuren erfolgt durch eine lichtmikroskopische oder rasterelektronenmikroskopische (REM) Betrachtung erzeugter Ritzspuren. Zur qualitativen Bewertung der Spanbildungsmechanismen schlägt GAHR [GAH81] des Weiteren das Verhältnis des abgetrennten Werkstoffvolumens zum Volumen der Verschleißfurche, die Kenngröße Abtrennfaktor f_{ab} , vor, die sich mithilfe der Kenngrößen Ritzquerschnittsfläche A_r sowie der Querschnittsflächen der seitliche Aufwürfe entlang einer Ritzspur A_1 und A_2 berechnen lässt, Formel 2-15. Der Abtrennfaktor f_{ab} ist insbesondere bei der Analyse der Bearbeitung duktiler Werkstoffe relevant. Der Wert f_{ab} liegt im Bereich $0 \leq f_{ab} \leq 1$, wobei die Effektivität der Zerspanung mit einer Steigerung des Abtrennfaktors f_{ab} wächst. Eine weitere Kenngröße, die zur Bewertung des Einkornritzens herangezogen werden kann, ist die spezifische Ritzenergie e_{cr} , Formel 2-16, dessen Verwendung insbesondere bei thermisch kritischen Prozessen sinnvoll ist [GIW03].

$$f_{ab} = \frac{A_r - (A_1 + A_2)}{A_r} \quad (2-15)$$

$$e_{cr} = \frac{F_{tr} \cdot v_{sr}}{A_r} \quad (2-16)$$

Zusammenfassend lässt sagen, dass das Einkornritzen in der Schleiftechnik bis dato sehr umfangreich untersucht bzw. eingesetzt wurde; die Zusammenhänge zwischen der Schleifwerkzeugspezifikation und den Stellgrößen mit dem Ergebnis des Einkornritzens sind weitestgehend geklärt. Der Einfluss unterschiedlicher Temperierungszustände von Bauteilen auf die Spanbildungsmechanismen beim Einkornritzen wurde bis jetzt jedoch nicht wissenschaftlich untersucht.

2.3 Schienenschleifen als Teil der Schieneninstandhaltung

2.3.1 Struktur der Schieneninstandhaltung

Unter Instandhaltung sind Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Soll-Zustandes sowie zur Feststellung und Neubeurteilung des Zustandes von technischen Mitteln eines Systems definiert [DIN 31051]. In Bezug auf die Schienen setzt sich die Instandhaltung aus Wartung, Inspektion und Instandsetzung zusammen. Das primäre Ziel einer Schienenwartung ist die Bewahrung des Sollzustandes von Funktionsbauteilen. Da die Schienenwartung tendenziell ausschließlich an lokalen Abschnitten durchgeführt wird, beispielsweise Schmierung von Schienen in besonders engen Bögen, ist die Komponente Schiene nahezu wartungsfrei. Unter Inspektion sind Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Schienenzustandes verstanden. Die Inspektion umfasst die Aufnahme von geometrischen Daten, wie beispielsweise Spurweite und Überhöhung, und die Aufnahme und Bewertung von Schäden und Verschleißerscheinungen, wie beispielsweise head checks oder Riffel. Daraus werden geeignete Instandsetzungsmaßnahmen, auch Reparatur ge-

nannt, abgeleitet, die einer Wiederherstellung des Soll-Zustandes der Schiene sowie der Gewährleistung ihrer Betriebssicherheit dienen [DIN31051, MAR91].

2.3.2 Detektion des Schienenzustandes

Die Kenntnis des Verschleißzustandes der Schienen ist für einen sicheren Fahrbetrieb von außerordentlicher Bedeutung. Die Auswahl an Methoden der Fehlererkennung in Schienen ist vielfältig. Als Hauptverfahren werden die ultraschall- und wirbelstrombasierte Verfahren eingesetzt. Durch die Länge des Einschallimpulses des Ultraschalls können Fehler in Oberflächennähe nicht erkannt werden, da es zu Überlagerungen mit der Reflektion kommt. Weiterhin können Risse, die entlang der Schallrichtung verlaufen, schwer detektiert werden [VOG04]. Weit verbreitet ist des Weiteren der Einsatz des Wirbelstromes zu Detektion der Schienendefekte. Aufgrund ferromagnetischer Eigenschaften der Schienen bewegen sich die Wirbelströme an der Oberfläche; bei der Anwesenheit eines Risses fließen die Wirbelströme an den Rissflanken entlang, wodurch eine Detektion der Risstiefe ermöglicht wird [DEY11, KRU02]. Als weitere Prüfverfahren können die Magnetpulver-, Lichtschnitt- sowie die Sichtprüfung genannt werden. GRASSIE ET AL. [GRA99] sowie SCHOECH [SCH00] stellen fest, dass es am sinnvollsten wäre, innerhalb eines Reparaturvorgangs die Detektion und die Reparatur von Schienenfehlern durchzuführen. Lautzeitigem Kenntnisstand können zwar der adhäsive Verschleiß und die äußere Rollkontaktermüdung messtechnisch zerstörungsfrei detektiert werden, die Tiefe der geschädigten Materialschicht, die meist eine martensitische Struktur aufweist, kann nicht qualifiziert werden. Die Qualifizierung des Zustandes der Schienenrandzonen hinsichtlich ihrer Härte und Eigenspannungen wird nach aktuellem Stand der Technik nicht durchgeführt. Messungen zur Qualitätskontrolle nach einem Schienenschleifvorgang sind wenig standardisiert und werden oft vernachlässigt.

2.3.3 Erkenntnisse zum Schienenschleifen zur Reparaturanwendung

Wissenschaftliche Erkenntnisse

Es wird zwischen dem Schienenschleifen vor Inbetriebnahme, dem so genannten initial rail grinding, sowie dem Schienenschleifen zur Reparaturanwendung, dem so genannten maintenance rail grinding, unterschieden. Das initial rail grinding erfolgt bei einer Neuverlegung der Schienen bzw. bei einem Austausch einzelner Abschnitte und dient dem Entfernen der Schweißnähte, einer Herstellung günstiger Kontaktbedingungen für den Rad/Schiene-Kontakt sowie einem Ausgleich der durch die metallurgische Herstellung eingebrachter Inhomogenitäten in der oberen Randzonenschicht. Eine wesentlich breitere industrielle Anwendung besitzt jedoch das Schienenschleifen zur Reparaturanwendung (maintenance rail grinding). Unter dem Begriff des Schienenschleifens wird tendenziell genau diese Kategorie verstanden [SCH10]. In vorliegender Arbeit wird ausschließlich dieses Verfahren behandelt.

Das Schienenschleifen ist Teil der Prozesskette zur Schieneninstandhaltung und dient im Wesentlichen einer Wiederherstellung anforderungsgerechter Maß- und Formgenauigkeiten und damit einer Vermeidung des kostenintensiven Schienenaustauschs [SCH10, IWN06 KNO01]. Eine detaillierte Beschreibung des Schienenschleifens als Teil der Schieneninstandhaltung gaben unter anderem MARX [MAR91], SCHMID [SCH10] und POINTNER [POI00]. Obwohl das Schienenschleifen industriell nachweisbar seit den 50er Jahren des 20. Jahr-

hunderts eingesetzt wird, sind die ersten wissenschaftlichen Erkenntnisse darüber dem Anfang der 80er Jahre datiert und stammen von der Forschergruppe von CLAYTON [CLA82a, CLA82b, CLA83]. Darin wurde das Schienenschleifen als eine Präventivmaßnahme gegen die Ausbildung von Rollkontaktermüdungsdefekten wie squats behandelt. Daraufhin veröffentlichte FUNKE [FUN84] das erste Fachbuch, das sich ganz dem Thema des Schienenschleifens widmete. Er erarbeitete eine der ersten Zusammenfassungen über den industriellen Stand zum Schienenschleifen. Darin wurden die damals bekannten Verschleißarten von Schienen differenziert, die Kinematiken von Schleifprozessen beschrieben sowie die Ansätze und Formel zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Schienenschleifens aufgestellt. Die steigende Relevanz des Schienenschleifens für die Gewährleistung des sicheren und vorhersagbaren Schienenbetriebes wurde bei der INTERNATIONAL HEAVY HAUL ASSOCIATION CONFERENCE (IHHA) festgestellt [PRO86]. Seit der Mitte der 90er Jahre wurde damit begonnen, das Schienenschleifen zusätzlich als Präventionsmaßnahme gegen die Rollkontaktermüdung auf den europäischen Schienenstrecken systematisch einzusetzen [GRA00, GRO00]. Die Veröffentlichungen von KALOUSEK ET. AL. [KAL97] sowie CANNON ET. AL. [CAN03] geben eine Zusammenfassung über den Stand der Technik bei der Klassifizierung der Schienendefekte mit den dazu gehörigen Schienenschleifstrategien. Auf den japanischen Hochgeschwindigkeitsstrecken wurde die Einführung des Schienenschleifens zwecks Vermeidung der Materialermüdungsdefekte etwa 10 Jahre später als in Europa durchgeführt [CAN03].

Unter Berücksichtigung der Arbeiten von SCHOECH [SCH07] sowie SCHMID [SCH10] können folgende fünf Hauptziele des Schienenschleifens zur Reparaturanwendung genannt werden:

- Ausbesserung der Schiene in der Längsrichtung durch das Entfernen von Riffeln und Welligkeiten,
- Ausbesserung der Schiene in der Querrichtung durch die Herstellung der Maß- und Formgenauigkeiten,
- Entfernung geschädigter Materialschichten, wie beispielsweise Schweißnähte und Ungenauigkeiten,
- Kontrolle bzw. Ausbesserung der Rollkontaktermüdungsschäden wie head checks oder squats,
- Reduktion von Überfahrgeräuschen durch Schaffung feiner Rauigkeitsprofile auf der Schienenoberfläche.

Die derzeitigen wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich des Schienenschleifens und der Schieneninstandsetzung befassen sich insbesondere mit einer betriebswirtschaftlichen und organisatorischen Optimierung, wobei Themen maintenance management und life cycle costs (LCC, Schienenbetriebskosten) intensiv behandelt werden [FAM14, VAL10, HEM07, LUN07, PAT07, VEI07, LIN06, ZHA06, LIC05, BMB05, LAR04, HIG98, CHR93, MAR85] fokussiert werden. MARKOW [MAR85] entwickelte eine bedarfsgesteuerte Vorgehensweise für die Berechnung der LCC durch den Vergleich der Kosten für unterschiedliche Reparaturstrategien. CHRISTMER UND SELIG [CHR93] verknüpften das mechanistische Modell für die Zeitberechnung eines Reparaturvorgangs mit dem Kostenmodell zur Identifikation der Kosten bei unterschiedlichen Reparaturstrategien. HIGGINS [HIG98] schlug ein innovatives Modell zur Bestimmung einer wirtschaftlich sinnvollen Verteilung von den Reparaturvorgängen und des Personals bei einer Schieneninstandsetzung vor. LARSSON [LAR04] entwickelte das Modell zur Kostenberechnung für die Schieneninstandhaltung bei einer inkonstanten

Streckenauslastung. LING [LIN06] entwickelte das Modell zur Kostenberechnung für Projekte zur Schieneninstandhaltung. ZHAO ET. AL [ZHA06] entwickelten das Modell zur Bestimmung der Liegedauer (life cycle model) von Schienen unter Berücksichtigung von in regelmäßigen Abständen durchgeführten Schienenschleifvorgängen. Des Weiteren beschäftigten sich PATRA ET. AL. [PAT07], VALE ET. AL. [VAL10], FAMUREWA [FAM14] primär zwar mit den Inspektionsverfahren, betrachtete jedoch ebenfalls das Schienenschleifen als das nachfolgende Reparaturverfahren im Zuge der Schieneninstandsetzung. Grundsätzlich ist zu verzeichnen, dass das Thema der LCC aufgrund der politisch angestrebten Steigerung der Interoperabilität, Attraktivität und Wirtschaftlichkeit des Schienenverkehrs eine große Relevanz auf paneuropäischer Ebene besitzt. Dies machte die betriebswirtschaftliche Betrachtung des Schienenschleifens zum Forschungsgegenstand der abgeschlossenen EU-Projekte CRMA (1998), REMAIN (1998), EcoSwitch (2002), IMPROVE-RAIL (2003), ProM@in (2003), LiberTiN (2005), MODTRAIN (2007), LICB (2007), INNOTRACK (2009), SUSTRAIL (2013) machte.

Weitere wissenschaftlichen Quellen mit Bezug auf das Schienenschleifen behandeln dessen Auswirkung auf die Lärmemissionen, wobei das Schienenschleifen als eine starre Störgröße mit einbezogen und seine Parameter weder analysiert noch optimiert werden [BEN09, LIC05, BMB05]. CUERVO ET. AL. [CUE14] betrachteten den Einfluss der Anzahl der Überschliffe an Schienen auf deren Verschleißraten. TAKIKAWA ET AL. [TAK15] stellten fest, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der nach dem Schleifen erzielten Rauheit mit den Lärmemissionen besteht. Es sind keine wissenschaftlichen Quellen bekannt, die eine werkzeug- und / oder prozesseitige Analyse des Schienenschleifens beinhalten. Nach LUND-MARK [LUN07] können die durch das Schienenschleifen erzielten relativ groben Rauheiten zu Problemen mit den Lärmemissionen sowie Vibrationen führen, insbesondere auf Strecken mit mittleren und geringen Achslasten, da dort der Ausgleich der Rauheiten relativ langsam vorangeht. Nach SCHMID [SCH10] kann durch die Beseitigung von Riffeln das Niveau der Lärmemissionen um bis zu 10 dB(A) gesenkt werden. Hierfür empfiehlt er den Einsatz von den besonders feinkörnigen Schleifwerkzeugen in Kombination mit den angepassten Prozessparametern.

Normenlage

Die Organisation und Durchführung der Schieneninstandhaltung werden durch die DIN-Normen [DIN EN 13674, DIN EN 13848, DIN EN 15302, DIN EN 13231, DIN EN 15594, DIN EN 14587] sowie die betreiberinternen Richtlinien für die Schieneninstandhaltung, beispielsweise die Richtlinien von DEUTSCHE BAHN AG [DB 824.4015, DB 824.5520, DB 824.5520Z01, DB 824.8210] spezifiziert. Aus der DIN-Norm [DIN EN 13231] können die Angaben bezüglich wirtschaftlicher Arbeitsfenster sowie der durch das Schienenschleifen zu erreichenden Maß- und Formgenauigkeiten an Schienen entnommen werden, Tabelle 2-2.

Tabelle 2-2: Einzuhaltende Maß- und Formgenauigkeiten beim Schienenschleifen [DIN 13231]

Kenngroße	zu erzielender Wert
Mittlere größte Höhe des Profils Rz	< 25 μm
arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten Ra	< 10 μm
Randzonenbeschaffenheit	keine Angaben
Ebenheit der Fahrfläche H	$\pm 0,5$ mm auf 1 m Schienenlänge

Insbesondere das Grenzmaß des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinaten Ra < 10 μm ist europaweit einheitlich und stellt nach LUNDMARK [LUN07] einen Kompromiss aus hohen möglichen Abtrennraten und relativ guter Oberflächenqualität. Hinsichtlich der Bearbeitungsproduktivität besteht beim Schienenschleifen grundsätzlich das Ziel, hohe bezogene Zeitspannungsvolumina zu erzielen, um Wartezeiten und Betriebsunterbrechungen zu reduzieren. Ein Grenzwert für die durch den Schleifprozess erzeugte thermische Veränderung der Schienenrandzone in Form von beispielsweise einer höchstzulässigen Tiefe der geschädigten Randzone z ist nicht gegeben. Aus diesem Grund erfolgt die Auswahl von Prozessparametern und Schleifwerkzeugen für das Schienenschleifen nach subjektiven Erfahrungswerten von Reparaturdienstleistern uneinheitlich und abhängig von den lokalen Gegebenheiten, was zu stark unterschiedlichen Reparaturergebnissen sowie oft auch zu einer unzureichenden Bearbeitungsqualität führt.

Schienenschleifstrategien

Nachfolgend soll soweit möglich und durch die Quellen von FRICK [FRI07], POINTNER [POI00], HEMPE [HEM07], SCHOECH [SCH08b, SCH07], LICHTENBERGER [LIC05], ZAREMSKI [ZAR10], KNOTHE [KNO01], Fachbücher von FENDRICH [FEN06], MARX [MAR91], FUNKE [FUN84] und Kontakte in die entsprechenden Firmen, der Stand der Technik zum Schienenschleifen abgeleitet werden. In Abhängigkeit der Ziele bzw. der Randbedingungen können drei Schienenschleifstrategien genannt werden:

- Korrektives Schleifen / corrective grinding,
- zustandbasiertes Schleifen / symptom related grinding und
- präventives Schleifen / preventive grinding.

Korrektives Schleifen ist die ursprüngliche Variante des Schienenschleifens. Korrektives Schleifen wird lokal an einzelnen Stellen der Schienenstrecke durchgeführt, die sichtbare Fehler beinhalten. Die Schleiftiefen sind dabei von der Tiefe der Schädigung abhängig und können bis 0,3 mm betragen. Diese Schienenschleifvariante kann des Weiteren zur Nachbearbeitung von Auftragschweißungen verwendet werden. Aufgrund steigender Anforderungen an die Qualität und Reproduzierbarkeit der Schleifarbeiten im Gleis besitzt korrektives Schleifen derzeit nur eine begrenzte Relevanz.

Zustandbasiertes Schleifen erfolgt als Folgeverfahren nach einer messtechnischen Erfassung des Ist-Schienenzustandes der Schiene, die Daten über die Geometrie und die Auftrittsfrequenz der Defekte liefert. Dabei erfolgt die Abtrennung eines konstanten Materialbetrages mit einer Tiefe von bis zu 0,1 mm von dem Schienenkopf. Gleichzeitig dient zustandbasiertes Schleifen einer Verminderung der Lärmemissionen, da dadurch plane Flächen mit den feinen Rauheiten hergestellt werden können. So können laut SCHMID [SCH10] infolge eines erfolg-

reichen Schleifvorganges die Überfahrgeräusche um bis zu 10 dB(A) reduziert werden. Zustandbasiertes Schleifen wird des Weiteren zum Teil eingesetzt, wenn die Defekte zwar vorhanden, jedoch das zulässige Grenzmaß nicht überschreiten. In diesem Fall überschneidet sich zustandbasiertes Schleifen teilweise mit präventivem Schleifen. Kinematisch gesehen werden hierbei die einfachen Schleifzüge eingesetzt, die meistens mehrere hintereinander angeordnete, vollautomatisch verstellbare Schleifeinheiten haben. Zur Bearbeitung von Fahrkante und Kopfseite können zusätzlich zu den Topfschleifscheiben zylindrische Schleifscheiben eingesetzt werden, die einen flexibleren Schwenkbereich haben. Die Bearbeitung erfolgt bei Geschwindigkeiten $v = 2 - 8 \text{ km/h}$. Die Werkzeuge werden bis auf $a_e = 0,03 \text{ mm}$ zugestellt, somit ergibt sich eine maximale Abtrennrates pro Werkzeug von $Q'_w = 67 \text{ mm}^3/\text{mms}$ [CUM15].

Das Hauptziel des präventiven Schienenschleifens ist es, eine konstant hohe Qualität der Schiene zu bewahren und eine Entwicklung vom Schienenverschleiß zu vermeiden bzw. zu reduzieren [SIL15, SCH10, KAL97]. Laut SROBA UND RONEY [SRO11] kann durch präventives Schienenschleifen die Liegedauer von Schienen um den Faktor 2 erhöht und die Gesamtbetreiberkosten um bis zu 20% reduziert werden. Diese Schienenschleifstrategie beruht auf der Zusammenwirkung zwischen der Rollkontaktermüdung und dem adhäsiven Schienenverschleiß. Dem Wachstum der Rollkontaktermüdung wird durch das Abschleifen definierter Materialbeträge entgegengewirkt. Die zeitlichen Abstände für das Schleifen sind durch die sogenannten „magischen“ Verschleißraten definiert, [Bild 2-5](#) [POI00, KAL97]. Bei der Planung der präventiven Schleifvorgänge werden Daten des Verkehrsaufkommens und der Anzahl der Überfahrten sowie der Gesamtachslasten berücksichtigt. Laut CANNON [CAN03] werden 50 % der Hauptstrecken im Fernverkehr präventiv geschliffen, in den USA sind es sogar 80 %. Als eine Faustregel gilt, dass minimale Schleifintervalle von etwa 10 - 15 MGT betragen müssen. Zum präventiven Schienenschleifen werden die Schleifzüge mit den angetriebenen Schleifwerkzeugen eingesetzt. Diese verfügen über bis zu 32 Fahrflächen- und Fahrkantenschleifwerkzeuge und ermöglichen Geschwindigkeiten im Bereich $v = 40 - 80 \text{ km/h}$. Die Werkzeuge sind zylindrische Schleifscheiben mit dem Umfangsdurchmesser von $d_s = 250 - 300 \text{ mm}$, die mithilfe des numerical control (NC) gesteuert werden [SCH10, MAR91]. Solche Schleifzüge werden beispielsweise durch die Firmen LINSINGER MASCHINENBAU GMBH, Österreich, SPENO INTERNATIONAL AG, Schweiz, und LORAM MAINTENANCE OF WAY, USA, hergestellt. Ferner ist die „high speed grinding“ (HSG)-Technologie marktverfügbar, die auf dem Einsatz von den nicht angetriebenen Schleifkörpern basiert, welche mit unterschiedlicher Schwenkposition hinsichtlich der Schiene zugestellt sind. Das HSG-Verfahren wird zur Reparatur von besonders relevanten Fernverkehrsstrecken angewendet und kann beim laufenden Eisenbahnbetrieb durchgeführt werden. Die HSG-Schleifzüge ermöglichen die Schleifbearbeitung mit Geschwindigkeiten bis zu $v = 120 \text{ km/h}$. Die Gesamtschleiftiefe bei einer Zugüberfahrt beträgt $a_e < 50 \mu\text{m}$ und wird durch insgesamt 96 aneinander folgende Schleifkörper realisiert. Dies ergibt eine Abtrennrates pro Schleifkörper von etwa $Q'_w < 15 \text{ mm}^3/\text{mms}$. Im Schleifzug sind insgesamt 8 Schleifkörperreihen mit je 12 Schleifkörpern vorhanden. Jede Schleifkörperreihe ist um den Winkel 90° versetzt, sodass eine gleichmäßige Bearbeitung des Schienenkopfes von beiden Seiten gewährleistet werden kann.

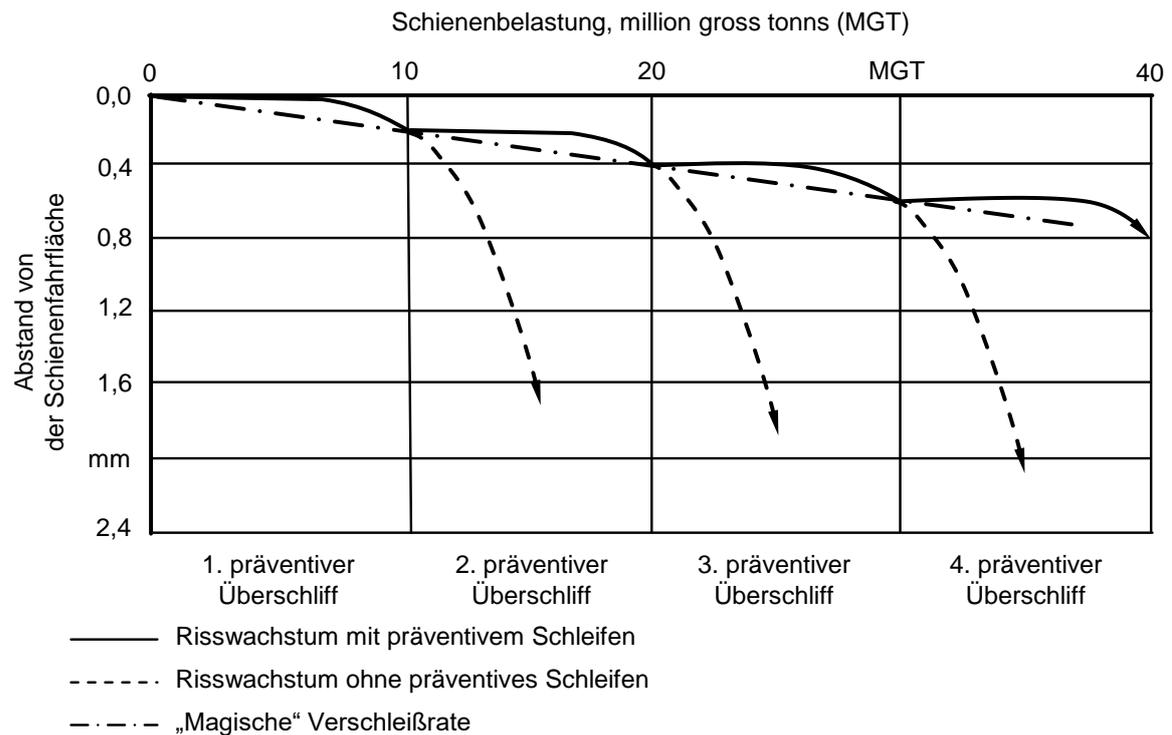


Bild 2-5: Präventives Schienenschleifen in Kombination mit „magischen“ Verschleißraten [POI00]

Schienenschleifprozesse

Aufgrund des zuvor aufgezählten Vielfaltes an Maschinentechiken zum Schienenschleifen wird deutlich, dass mehrere unterschiedliche Schleifverfahrensvarianten zum Einsatz kommen können. Zusammenfassend lassen drei Gruppen von Schleifprozessen mit rotierenden Werkzeugen identifizieren, [Bild 2-6](#):

- Längs-Umfangs-Planschleifen mit zylindrischen Schleifscheiben,
- Längs-Umfangs-Profilerschleifen mit profilierten Schleifscheiben,
- Längs-Seiten-Planschleifen mit Topfschleifscheiben.

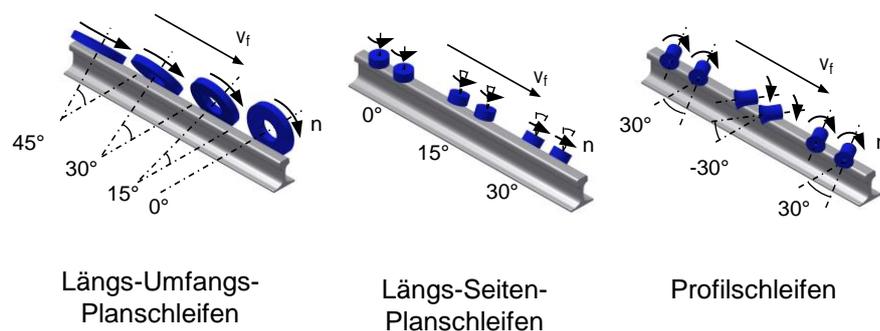


Bild 2-6: Schienenschleifprozesse

Bei der Auslegung der Schleifprozesse ist eine korrekte Auswahl der Prozessstellgrößen, durch die das Bearbeitungsergebnis erheblich beeinflusst wird, von größter Bedeutung. Aktuell wird es jedoch mit den nach subjektiven Einschätzungen des Maschinenbedieners ausgewählten Prozessstellgrößenkombinationen gearbeitet. Während der Bearbeitung variieren

die Bearbeitungsparameter oft stark, so dass zusätzlich Schwankungen des Arbeitsergebnisses und ein variables Schieneneinsatzverhalten erzeugt werden können [GRA99]. Die Beeinflussung der Randzonenbeschaffenheit durch die Schienenschleifprozesse ist der Forschungsgegenstand einzelner Publikationen. FAU ET AL. [FAU15] stellten fest, dass die durch das Schleifen erzeugten Oberflächentopographien bzw. Rauheitswerte die nachfolgende Liegedauer der Schienen im Betrieb beeinflussen können: Bei zu hohen Werten der Rauheit Rz kann es zu plastischen Verformungen bzw. zu Ausbröckelungen kommen. TAKIKAWA ET AL. [TAK15] variierten den Anpressdruck von Schleifscheiben F_a , der mit der Zustellung zusammenhängt, und kamen zum Schluss, dass die Steigerung des Anpressdruckes F_a mit der Reduktion der Rauheit Rz korreliert. CHEN UND ISHIDA [CHE15] sowie LUNDMARK [LUN07] untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Rauheiten nach dem Schienenschleifen auf die die Rollkontaktermüdung im Rad/Schiene-Kontakt und kamen zum Schluss, dass dieser Einfluss teilweise sichtbar ist: Bei höheren Rauheiten konnten tendenziell höhere Verschleißraten von Schienen festgestellt werden. KAPOOR ET AL. [KAP02] zeigten auf, dass die groben Rauheiten nach dem Schienenschleifen zur Veränderung des Eigenspannungszustandes in randzonennahen Bereichen der Schiene führen können. Derzeit besteht ein großer Bedarf, den Einfluss der Rauheit auf das Einsatzverhalten der Schiene besser zu erforschen. Zukünftig sollen die erzielbaren Rauheiten auf Schienen gesteigert werden, da das bei dem Einsatz von innovativen höherfesten Schienenwerkstoffen Vorteile in Bezug auf Tribologie des Reibungskontaktes Rad/Schiene haben kann [KAP02].

Der Einfluss der Prozessparameter Umfangsgeschwindigkeit v_s , Vorschubgeschwindigkeit v_f und Zustellung a_e auf die Oberflächen- und Randzonenbeschaffenheit und die nachfolgende Liegedauer der Schienen ist nur unzureichend analysiert bzw. bekannt. Hinsichtlich der Auswirkung der Schienenschleifprozesse auf die Schienenrandzone vermuteten KALOUSEK ET AL. [KAL13], dass aufgrund hoher Bearbeitungstemperaturen sich in der Schiene eine martensitische Randzonenschicht mit einer Härte von bis zu 1000 HV ausbilden könnte, die aufgrund von den dort vorhandenen Makrofasern schneller verschleifen kann. CANNON ET AL. [CAN03] erwähnten, dass die Schienen infolge eines Einsatzes von den nicht geeigneten Schleifparametern bzw. -werkzeugen beschädigt werden können.

Werkzeuge für das Schienenschleifen

Die für das Schienenschleifen eingesetzten Schleifwerkzeuge haben, unabhängig von Form und Größe, eine vergleichbare Zusammensetzung: Schneidkorn aus Schmelzkorund (Al_2O_3) mit Korngrößen 16 - 30 Mesh sowie eine Kunstharzbindung. Dies ist durch die mit diesen Spezifikationen grundsätzlich erzielbaren hohen Abtrennraten in Kombination mit geringem Werkzeugradialverschleiß Δr und dementsprechend geringen Kosten motiviert. In Bezug auf die Werkzeugform werden ausschließlich zylindrische oder Topfschleifwerkzeuge im Durchmesserbereich $d_{kg} = 120 - 400$ mm eingesetzt. KALOUSEK ET AL. [KAL13] stellen fest, dass der Materialabtrag sowie die Oberflächenqualität beim Schienenschleifen unter anderem stark von der Korngröße des eingesetzten Schleifwerkzeuges abhängig ist. Weitere Forschungsarbeiten hinsichtlich der Untersuchung von verschiedenen Werkzeugstellgrößen auf die Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen liegen nicht vor.

Die ersten wissenschaftlichen Erkenntnisse zu den Zusammenhängen zwischen den einzelnen Prozessstellgrößen, den Rauheitsparametern und dem Einfluss auf die Randzone beim Schienenschleifen wurden am INSTITUT FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND FABRIKBETRIEB DER

TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BERLIN [UHL12, UHL13a, UHL13b, UHL13d, UHL14a, UHL14b, UHL15a, UHL15b, UHL16] geschaffen. Dabei wurden mehrere industrierelevante Schienenschleifprozesse hinsichtlich Produktivität, Qualität und Randzonenbeeinflussung untersucht. Die wesentlichen Erkenntnisse sind dabei:

- Die Auswirkung verschiedener Schienenschleifprozesse auf das Bearbeitungsergebnis ist erheblich.
- Die Randzonenveränderungen, die durch industrieübliche Prozesse entstehen, konnten klar nachgewiesen werden.
- Die Anforderungen bezüglich der Oberflächenqualität wurden mit allen getesteten Schienenschleifprozessen erfüllt.

2.3.4 Alternative Fertigungsverfahren zur Schieneninstandhaltung

Das Schleifen mit rotierenden Werkzeugen ist nicht das einzige zerspanende Verfahren, das zur Schieneninstandsetzung verwendet wird. Nach SCHMID [SCM10] und MARX [MAR91] kann das Schleifen mit den starren abrasiven Blöcken, den sogenannten Schleifsteinen, zum Einsatz kommen. Diese werden bei einer oszillierenden Bewegung entlang der Schienen gezogen. Die Möglichkeit zur Reprofilierung der Schiene ist bei diesem Verfahren nicht gegeben. Die Maschinentechiken arbeiten mit bis zu 16 Schleifsteinen mit pneumatischer Zustellung, die bei einem Anpressdruck der Schleifsteine von bis zu 30 N/mm² zugestellt werden. Die Bearbeitung erfolgt bei den Vorschubgeschwindigkeiten $v_f = 12 - 18$ km/h. Pro eine Überfahrt kann damit ein Materialabtrag bzw. eine Zustellung von bis zu 75 µm realisiert werden. Aufgrund des komplexen Schienenprofils mit den teilweise nicht einheitlichen Abmessungen des Schienenkopfes existieren des Weiteren die Anwendungen der adaptiven Schleifverfahren, wie beispielsweise das Bandschleifen, zur Schienenreparatur.

Bei einzelnen Reparaturanwendungen zur Schienenreprofilierung wird das Schienenfräsen eingesetzt. Die Schienenfräszüge werden durch LINSINGER MASCHINENBAU GMBH, Steyrermühl, Österreich, produziert. Diese bestehen aus separaten Fräsköpfen, die eine Bearbeitung inneren Fahrkante und der Schienoberfläche ermöglichen. Die Fräszustellung wird dabei durch die Exzenterstellorgane realisiert. Die Fräswerkzeuge sind für den Durchmesser $d_{kg} = 300 - 400$ mm ausgelegt, besitzen jeweils 22 - 26 Wendeschneidplatten und ermöglichen eine hochproduktive Bearbeitung bei Geschwindigkeiten bis 80 km/h und die Zustellungen von $a_e = 0,2 - 2$ mm. Zwecks Oberflächenentgraten nach Schienenfräsen wird bei einzelnen Anwendungen auch Bürsten eingesetzt [MAR91].

2.3.5 Externe Einflussfaktoren auf das Schienenschleifen

Anders zu den meisten Prozessen in der Teilefertigung wird das Schienenschleifen an verschiedenen zu reparierenden Stellen des Schienennetzes ausgeführt, was zusätzliche Einflussfaktoren auf die Bearbeitungsergebnisse mit sich bringen kann. Anhand von mehreren Literaturquellen können zusammenfassend zwei Haupteinflussfaktoren, die Umgebungs- bzw. Schienentemperatur sowie der Niederschlag, identifiziert werden [KIM11, ZAR10, AND09, EVA04, POI00]. Obwohl die aufgelisteten Einflussfaktoren vermutlich auch auf die durch das Schienenschleifen erzielten Bearbeitungsergebnisse eine Auswirkung haben, sind diese bis dato kaum untersucht und bei der Auslegung von den Schienenschleifvorgängen kaum berücksichtigt.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Trotz der breiten Anwendung ist das Schienenschleifen derzeit kaum Gegenstand grundlegender Forschung. Dies wird zusätzlich durch die lückenhafte Normung schon auf nationaler Ebene unterstrichen. Die Auslegung von Schienenschleifprozessen fundiert auf empirischem Anwenderwissen, wodurch die Qualität und Reproduzierbarkeit der Bearbeitung und somit die nachfolgende Liegedauer der Schienen stark variieren. Um einheitliche und effiziente Schienenschleifprozesse für unterschiedliche Reparaturanwendungen im Schienenverkehr auslegen zu können, müssen zunächst die derzeit nur sehr begrenzt vorliegenden Grundlagent Erkenntnisse hinsichtlich der Interaktionen zwischen den prozess- und werkzeugspezifischen Stellgrößen und den damit erzielten Bearbeitungsergebnissen erweitert werden. Aufgrund der Tatsache, dass das Schienenschleifen ein Reparaturverfahren ist, das tendenziell vor Ort bei stark schwankenden Witterungsverhältnissen und unter Verwendung von mobilen Schleiftechniken durchgeführt wird, ist die Analyse der externen Umweltbedingungen auf die Bearbeitungsergebnisse unabdingbar. Zwei davon, die Temperatur der Schiene und der Niederschlag, können nach Einschätzungen der Industrie und Forschung die Oberflächen- und Randzonenqualität besonders stark beeinflussen und werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit untersucht. Bei der Analyse der Bearbeitungsergebnisse wird der Ausbildung der Randzonenbeschaffenheit der Schienen eine besondere Aufmerksamkeit zugeteilt, da diese aufgrund der für das Schienenschleifen üblichen trockenen Bearbeitung bei hoher Produktivität der Bearbeitung im besonderen Maß beeinflusst wird. Zur eindeutigen Qualifizierung und Bewertung der Bearbeitungsergebnisse müssen Wirkzusammenhänge zwischen unterschiedlichen Zuständen der Schienenrandzone und dem tribologischen Einsatzverhalten der Schiene untersucht und charakterisiert werden.

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist der Aufbau einer Erkenntnisbasis zu werkzeug- und prozessseitigen Grundlagen des Schienenschleifens unter Berücksichtigung der Schientemperatur und deren Wechselwirkung mit dem Einsatzverhalten der Schiene. Damit wird ein Beitrag zur Steigerung der Qualität und Wirtschaftlichkeit des Schienenschleifens geleistet. Ein zu erwartendes homogenes Verschleißverhalten der geschliffenen Schienen wird des Weiteren zu einer Leistungsverbesserung dieser Infrastrukturkomponente führen, was mit einer Einsparung von Materialressourcen und Senkung der durch die Reparaturvorgänge verursachten Streckenstillzeiten verbunden ist. Aus dem Hauptziel leiten sich insgesamt fünf Teilziele ab, die im Folgenden einzeln erläutert werden, Bild 3-1.

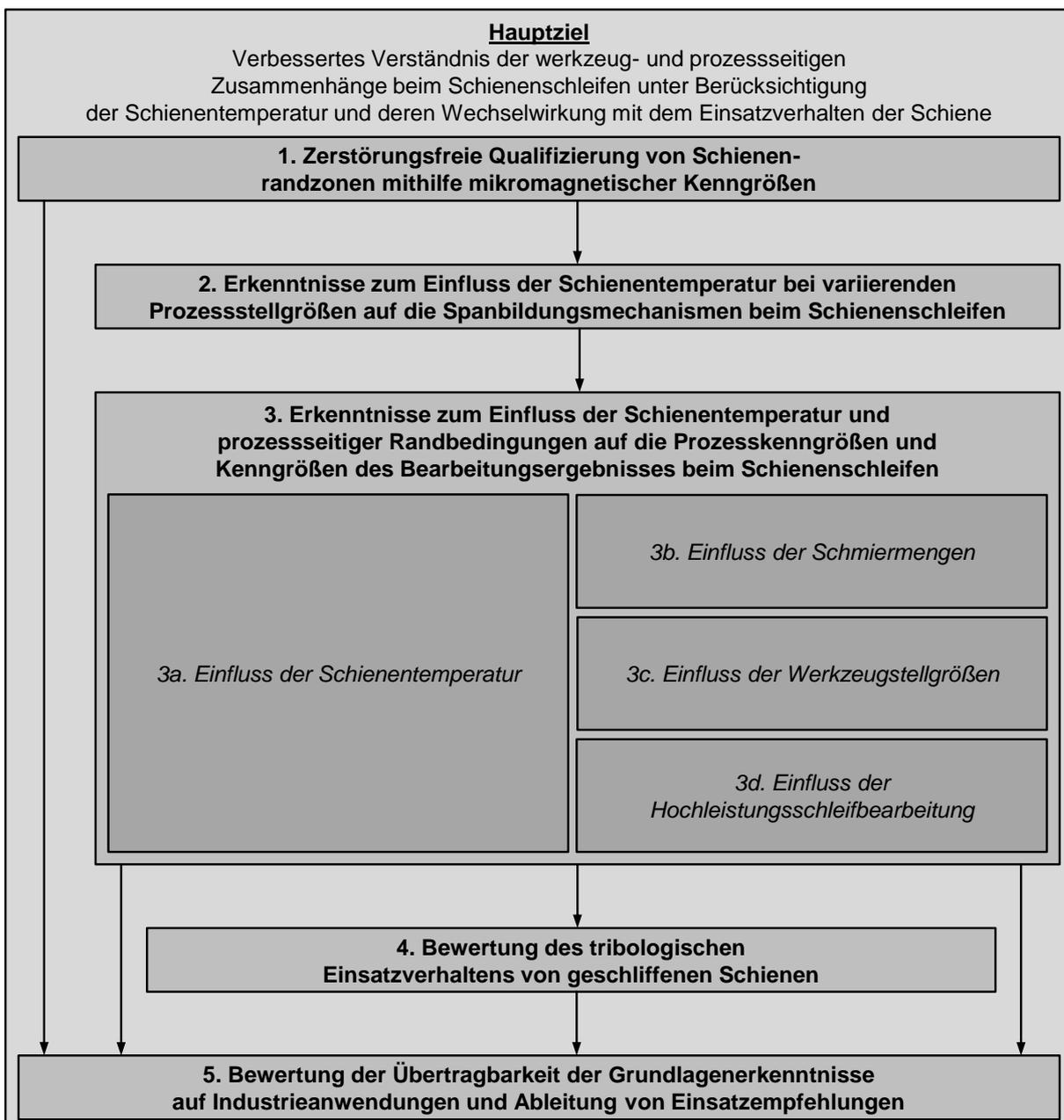


Bild 3-1: Untergliederung des Hauptziels der Dissertation in Teilziele

Teilziel 1: Zerstörungsfreie Qualifizierung von Schienenrandzonen mithilfe mikromagnetischer Kenngrößen

Eine der größten Herausforderungen bei den derzeitigen Infrastrukturarbeiten auf den Schienen stellt die vollständige Zustandserfassung von Schienenrandzonen hinsichtlich der Gefügebeschaffenheit und Härte im zerstörungsfreien Modus dar. Dies betrifft den Zustand von verschlissenen unreparierten Schienen, die eine Vielzahl an Ermüdungsdefekten aufweisen können. Ferner wird darunter die Qualifizierung der durch das Schleifen generierten Randzonenveränderungen verstanden. Dessen präzise und eindeutige Analyse soll eine genaue Abschätzung des nachfolgenden Einsatzverhaltens der Schiene im Betrieb ermöglichen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden mehrere auf der Ummagnetisierung der Schienenstahlwerkstoffe basierende mikromagnetische

Messverfahren hinsichtlich der Eignung zur messtechnischen Bewertung von Schienenrandzonen geprüft und eine Vorgehensweise für einen effektiven Einsatz entwickelt. Der Vorteil der mikromagnetischen Messverfahren im Vergleich zu den anderen im Gleis eingesetzten zerstörungsfreien Messverfahren besteht in einer Aufnahme des ganzheitlichen Randzonenzustandes der Schiene, der sich aus dem Materialgefüge, Eigenspannungszustand und Härte zusammensetzt. Schlussendlich wird auf Basis der empirischen Ergebnisdatenbank ein deskriptives Modell, das die Messdaten mit den konkreten Randzonenzuständen in den Schienen verknüpft, entwickelt und verifiziert.

Teilziel 2: Erkenntnisse zum Einfluss der Schientemperatur bei variierenden Prozessstell- größen auf die Spanbildungsmechanismen beim Schienenschleifen

Wie im Stand der Forschung dargelegt, ist der Einfluss der Schientemperatur auf die Spanbildungsmechanismen beim Längs-Umfangs-Planschleifen metallischer Werkstoffe weitestgehend unbekannt. Es kann dennoch davon ausgegangen werden, dass die Werkstücktemperatur aufgrund der Veränderung der mechanisch-physikalischen Kennwerte das Materialverformungs- und Spanfließvermögen nennenswert beeinflusst. Bei einer Schleifbearbeitung von Schienen mit unterschiedlichen Temperaturen sind aus diesem Grund unterschiedliche Spanbildungsmechanismen zu erwarten. Dies hat variierende Prozesskennwerte zur Folge, wodurch wiederum unterschiedliche Bearbeitungsergebnisse zu erwarten sind. Zur systematischen Untersuchung und Quantifizierung des funktionalen Zusammenhanges zwischen der Schientemperatur mit den die Spanbildung charakterisierenden Kenngrößen werden umfangreiche Einkornritzversuche durchgeführt. Die grundlegenden Interaktionen zwischen dem Schleifkorn und der in der Temperatur variierenden Schiene werden nachgebildet. Zusätzlich erfolgt die Analyse des Einflusses der kinematischen sowie geometrischen Parameter eines Schleifprozesses auf die Spanbildungsmechanismen, wofür mehrere Werte von Ritzumfangsgeschwindigkeiten und Zustellungen variiert werden, die aus den Analogieschleifprozessen abgeleitet sind. Ergänzend zu den rein empirischen Erkenntnissen erfolgt abschließend eine modellhafte Beschreibung der Zielgrößen der Einkornritzversuche, die einem besseren Verständnis und der Vorhersage der temperaturabhängigen Spanbildungsmechanismen beim Schienenschleifen dienen soll.

Teilziel 3: Erkenntnisse zum Einfluss der Schientemperatur und prozessseitiger Randbedingungen auf die Prozesskenngrößen und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen

Zur anforderungsgerechten Auslegung von Prozessen und Werkzeugen wird das derzeit nur lückenhaft vorliegende technologische Wissen über die grundlegenden Zusammenhänge zwischen den wesentlichen Prozessstellgrößen, in Kombination mit der Schientemperatur, mit den Bearbeitungsergebnissen beim Schienenschleifen systematisch generiert. Dazu werden insgesamt vier Untersuchungsgegenstände vorgesehen. Der Einfluss der Schientemperatur, der Schmiermengen, der Werkzeugstellgrößen sowie erhöhter Zeitspannungsvolumina bei der Bearbeitung werden untersucht. Alle genannten Versuchsreihen beziehen eine systematische Variation wesentlicher Schleifstellgrößen, die Umfangsgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit und Zustellung, mit ein. Als Bearbeitungsergebnisse werden primär die Oberflächen- und Randzonenqualität beschreibenden Kenngrößen sowie zu deren

besseren Interpretation die Prozesskennwerte, wie die Schleifkräfte und Schleifenergien analysiert. Die Analyse der genannten technologischen Einzelaspekte des Schienenschleifens schafft im Ergebnis eine Wissensdatenbank bzgl. der Zusammenhänge zwischen dem Schleifprozess, der Bearbeitungsqualität und dem Einsatzverhalten. Anschließend dienen die gewonnenen Erkenntnisse als Datenbasis für deskriptive Prozessmodelle. Die Modelle werden in Form einer multi-modalen Regressionsanalyse (MLR) erarbeitet und durch zusätzliche Schleiftests verifiziert. Dadurch wird eine weitere Wissenslücke geschlossen, da zur Auslegung des Schienenschleifens derzeit keine Modelle bekannt sind. Das Teilziel 3 stellt den technologischen Kern der vorliegenden Arbeit dar.

Einfluss der Schientemperatur

Zur Klärung der Forschungsfrage, ob und wie stark die Temperatur der Schienen die Bearbeitungsergebnisse beeinflusst wird eine Versuchsumgebung zur gezielten Schientemperierung im Bereich $T_s = -60 - 80 \text{ °C}$ realisiert und der Einfluss der Schientemperatur auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte systematisch untersucht. Zur Interpretation der Ergebnisse werden dabei die Erkenntnisse der temperaturabhängigen Spanbildungsmechanismen (Teilziel 2) herangezogen. Als Ergebnis wird eine Wissensbasis aufgebaut, die eine zielgerechte Auswahl von Schleifprozessen in Abhängigkeit der Außentemperatur ermöglicht.

Einfluss der Schmiermengen

Schienenschleifprozesse werden nach derzeitigem Stand der Forschung tendenziell trocken ausgeführt. Weiterhin stellt der Niederschlag vermutlich einen weiteren externen Einflussfaktor auf die Bearbeitungsergebnisse des Schienenschleifens dar. Es wird daher die Durchführung einer systematischen Analyse und Bewertung der unterschiedlichen Schmiermengen bei der Schienenschleifbearbeitung vorgesehen. Hierbei werden folgende Forschungsfragen geklärt:

- In welchem Maß unterscheiden sich die unter Verwendung von verschiedenen Schmiermengen erzielten Bearbeitungsergebnisse von diesen bei einer Trockenbearbeitung?
- Hat der Niederschlag eine signifikante Auswirkung auf die Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen?

Außer der Trockenbearbeitung, findet dabei eine systematische Untersuchung von zwei weiteren Schmierstrategien statt. Zunächst wird die Schmierung mithilfe der sogenannten Kühlschmierstoffbenetzung des Werkzeuges und der Schiene analysiert. Diese bildet zum einen die in den mobilen Schleiftechniken einfach umzusetzende Minimalmengenschmierung mit ab und zum anderen ermöglicht diese gleichzeitig die Betrachtung des Niederschlages beim Schienenschleifen, da die Volumenströme in einem ähnlichen Bereich liegen. Ferner wird die Bearbeitung mit einer Überflutungskühlung unter Verwendung der für das Längs-Umfangs-Planschleifen von werkstoffähnlichen Materialien üblichen Volumenströme untersucht.

Einfluss der Werkzeugstellgrößen

Derzeit kommen zum Längs-Umfangs-Planschleifen auf den Schienen ausschließlich harte konventionelle Schmelzkorundscheifscheiben mit einer Kunstharzbindung zum Einsatz, die nicht primär für den Einsatz des Schienenschleifens entwickelt werden. Im Zuge des stets größer werdenden Einsatzgebietes des Schienenschleifens sowie einer kontinuierlichen Steigerung der Qualitätsanforderungen besteht derzeit ein großer Bedarf hin zu einer an-

wendungsgerechten Auslegung von Werkzeugzusammensetzungen primär basierend auf den Anforderungen und Randbedingungen der Schienenschleifbearbeitung. Solche Werkzeuge liefern insbesondere eine verbesserte Wärmeleitung und ein vorhersagbares Kornverschleißverhalten. Zur Umsetzung des Untersuchungsgegenstandes werden zunächst mehrere innovative Werkzeugzusammensetzungen entwickelt und realisiert. Deren Eignung wird im Rahmen von Schleifversuchen analysiert und mit der Leistung von den zum Schienenschleifen derzeit industriell eingesetzten Werkzeugspezifikationen bewertet. Anschließend wird die Frage geklärt, ob der Einsatz der untersuchten innovativen Werkzeugzusammensetzungen aus wirtschaftlich-technischer Sicht sinnvoll ist sowie Maßnahmen für eine weitere werkzeugseitige Optimierung des Schienenschleifens abgeleitet.

Einfluss der Hochleistungsschleifbearbeitung

Das weitere Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Analyse der Auswirkung erhöhter Produktivitätswerte der Schienenschleifbearbeitung auf die Prozesskennwerte und Bearbeitungsergebnisse. Motivation dazu sind derzeitige industrielle Bestrebungen zur Steigerung der Produktivität der Schienenschleifbearbeitung und teilweise zur Durchführung von Reparaturmaßnahmen im laufenden Betrieb. Im Rahmen dieses Untersuchungsgegenstandes wird der funktionale Zusammenhang zwischen einer systematischen Erhöhung des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w unter separater Steigerung der Schleifstellgrößen Vorschubgeschwindigkeit v_f und Zustellung a_e mit der Oberflächen- und Randzonenqualität untersucht. Anschließend werden technologisch und wirtschaftlich sinnvolle Produktivitätsbereiche aufgezeigt und Ansätze zur Steigerung der Bearbeitungsproduktivität, ohne die Qualität in signifikantem Maß zu beeinflussen, abgeleitet.

Teilziel 4: Bewertung des tribologischen Einsatzverhaltens von geschliffenen Schienen

Per Definition soll durch das Schienenschleifen eine hohe, vorhersagbare Liegedauer der Schienen erzielt werden. Nach derzeitigem Stand des Wissens bleibt offen, welche Randzonenbeschaffenheiten zur Gewährleistung eines hinreichend hohen Verschleißverhaltens geeignet sind. Zur Umsetzung des Teilziels 4 werden daher Erkenntnisse über das mechanisch-plastische Ermüdungsverhalten von geschliffenen Schienenrandzonen bei den üblichen im Rad/Schiene-Kontakt herrschenden Kontakt- und Belastungsbedingungen erlangt. Dies erfolgt im Rahmen tribologischer Untersuchungen, für welche ein konkreter Anwendungsfall herangezogen wird, der einem Rad/Schiene-Kontakt im geraden Gleis mit adhäsivem Verschleiß sowie der Rollkontaktermüdung als vorherrschenden Verschleißmechanismen entspricht. Als Stellgrößen kommen für die tribologischen Untersuchungen die Parameter Radlast, Belastungsintensität und Überrollgeschwindigkeiten zum Einsatz. Das Hauptergebnis dieser Versuchsreihe ist eine Wissensdatenbank über die Zusammenhänge zwischen dem Zustand der Schienenrandzone nach dem Schleifen mit dem nachfolgenden Einsatzverhalten im Betrieb. Mit diesem Wissen erfolgt die abschließende Bewertung der untersuchten Schienenschleifprozesse hinsichtlich der Bearbeitungsqualität.

**Teilziel 5: Bewertung der Übertragbarkeit der Grundlagenerkenntnisse
auf Industrieanwendungen und Ableitung von Einsatzempfehlungen**

Im Rahmen des Teilziels 5 erfolgt die Überführung der Grundlagenerkenntnisse in die industrielle Praxis. Die Aussagekraft der technologischen Ergebnisse zum Schienenschleifen und des tribologischen Einsatzverhaltens der Schiene werden bewertet. Dafür werden reale Schienensegmente aus dem Bereich des Berliner Ortsverkehrs eingesetzt. Die tribologischen Untersuchungen erfolgen unter Abbildung eines 1:1 Rad/Schiene-Kontaktes. Die entwickelte Vorgehensweise der zerstörungsfreien Vermessung der Schienenradzonenbeschaffenheit mithilfe mikromagnetischer Parameter wird verifiziert. Unter Berücksichtigung der erzielten Erkenntnisse erfolgt anschließend die Erarbeitung von Reparaturprozessketten für die Schienenschleifanwendungen aus dem Orts- und Nahverkehr.

4 Versuchsbedingungen und Messmethoden

Aus der im Kapitel 2.3.3 gezeigten Vielfalt an Schienenschleifprozessen zur Reparaturanwendung wurde für die vorliegende Arbeit eine konkrete Applikation identifiziert: Das Längs-Umfangs-Planschleifen der Schienenfahrfläche an den geraden Schienen unter Verwendung von zylindrischen Schleifwerkzeugen. Dieses Reparaturszenario findet sowohl im Orts- als auch im Nah- und Fernverkehr eine breite Anwendung, unter anderem im Berliner Straßennetz. Das Schleifen wird hierbei zwecks der Beseitigung von Rollkontaktermüdung sowie zur Reprofilierung von Schienen durchgeführt. Die Umfangsgeschwindigkeit liegt im Bereich von $v_s = 20$ bis 50 m/s. Die Zustellung a_e beträgt in Abhängigkeit des zu reparierenden Streckenabschnittes und des Maschinenbedieners $a_e = 0,01$ bis $0,1$ mm. Das ausgewählte Reparaturszenario wird durch diverse andere Nahverkehrsbetriebe deutschlandweit eingesetzt und kann somit als weit verbreitet bezeichnet werden. In Deutschland variiert die Umgebungstemperatur von $T = -20$ °C bis $T = 40$ °C in Abhängigkeit von Region und Jahreszeit. Um den Einfluss der Werkstücktemperierung besser aufzuzeigen, werden weiterhin zwei „extreme“ Temperaturwerte, $T = -60$ °C und $T = 80$ °C, für Untersuchungen mit aufgenommen. Aufgrund der einfach nachzuvollziehenden Kinematik und Eingriffsverhältnisse ist das Längs-Umfangs-Planschleifen von Schienen eine gut geeignete Applikation, um zu den grundlegenden Erkenntnissen im Bereich des Schienenschleifens zu gelangen.

4.1 Prozesskinematik und Versuchsplanung

Einkornritzversuche

Die Einkornritzversuche dienen einer grundlegenden Analyse der Spanbildungsmechanismen beim Schienenschleifen unter Variation der Prozessgrößen und Bauteiltemperaturen. Anhand der anschließenden Analyse der Geometrie erzeugter Ritzspuren sollen Aussagen über die Effektivität der Schleifbearbeitung getroffen werden. Die Einkornritzversuche werden trocken unter Berücksichtigung der für das Schienenschleifen relevanten Prozessstellgrößen und Randbedingungen durchgeführt, die in Tabelle 4-1 aufgelistet sind. Es wird die in der Forschungslandschaft gängige Kinematik des Tauchritzens eingesetzt. Um die zu erwartende temperaturabhängige Verschiebung der Spanbildungsmechanismen zu identifizieren, werden darüber hinaus jedoch auch deutlich kleinere und größere Spanungsdicken h_{cu} , als im Schienenschleifprozess auftreten, angestrebt. Damit können letztlich temperaturabhängige Prozessparameterverschiebungen und -optimierungen vorgenommen werden. Insgesamt werden drei Ritzumfangsgeschwindigkeiten, $v_{sr} = 30$ m/s, $v_{sr} = 40$ m/s und $v_{sr} = 50$ m/s, untersucht, die den bei dem Schienenschleifen eingesetzten Umfangsgeschwindigkeiten v_s entsprechen. Während jedes Ritzversuches wird die Zustellung a_{er} von $a_{er} = 0$ beim ersten Ankratzen bis zum maximalen Wert der Ritzzustellung von $a_{er} = 0,015$ mm gesteigert. Zur Auswertung werden vier Werte der Ritzzustellung, $a_{er} = 0,003$ mm, $0,006$ mm, $0,009$ mm und $0,012$ mm, herangezogen. Aufgrund der ausgewählten Kinematik wird der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit v_f bei den Einkornritzversuchen nicht verfolgt. Die Versuchsdurchführung ist vollfaktoriell; zur Absicherung werden zwei Wiederholversuche durchgeführt. Die Analyse der Einkornritzversuche erfolgt werkstückseitig, d. h. ausschließlich die die Ritzspurengeometrie beschreibenden Kenngrößen, verbunden mit den dazugehörigen Ritzkennwerten, werden betrachtet.

Zur qualitativen Bewertung von Einkornritzversuchen werden die Kenngrößen Abtrennfaktor f_{ab} , Ritznormal- F_{rn} und Ritztangentialkraft F_{rt} sowie die spezifische Ritzenergie e_{cr} analysiert, die Rückschlüsse über die Abtrennmechanismen zulassen. Deren Berechnung kann Formel 2-8 und Formel 2-9 entnommen werden. Die zur Berechnung des Abtrennfaktors f_{ab} notwendigen Kenngrößen Ritzquerschnittsfläche A_r sowie die Querflächen der seitlichen Aufwürfe entlang einer Ritzspur A_1 und A_2 werden durch eine taktile Vermessung in definierten Abständen entlang der Ritzspur ermittelt. Darüber hinaus werden anhand von Analyse der REM-Aufnahmen qualitative Aussagen über die Ritzspuren, unter besonderer Beachtung von möglicherweise auftretenden Rissen, gewonnen. Damit kann beispielsweise der Übergang von dominant duktiler zu dominant sprödharter Spanbildung identifiziert werden. Der zur Berechnung der spezifischen Ritzenergie e_{cr} notwendige Kennwert Ritztangentialkraft F_{rt} wird während der Ritzversuche gemessen und synchron mit der Achsposition der Maschine mittels der Software LabView® der NATIONAL INSTRUMENTS, Austin, USA, aufgezeichnet.

Tabelle 4-1: Versuchsplanung der Einkornritzversuche

Prozessstellgröße	Wert
Temperatur des Ritzwerkstückes T_r	- 60 °C; - 40 °C; - 20 °C; 0 °C; 20 °C; 40 °C; 60 °C; 80 °C
Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr}	30 m/s; 40 m/s; 50 m/s
Ritzzustellung a_{er}	0 - 0,015 mm; kontinuierlich; Steigerung pro Werkzeugumdrehung 0,001 mm; zur Auswertung werden $a_{er} = 0,003$ mm, 0,006 mm, 0,009 mm, 0,012 mm herangezogen
Kühlung	Trockenbearbeitung
Versuchsplanung	vollfaktoriell
statistische Absicherung	zwei Wiederholungen je Parametersatz

Schleifversuche

Die Versuchsplanung zur grundlegenden Analyse des Schienenschleifens ist in Tabelle 4-2 dargestellt. Es werden absichtlich gleiche anwendungsspezifische Bereiche von Umfangsgeschwindigkeit, wie schon bei den Ritzversuchen, herangezogen. Damit können Wechselwirkungen mit oder zwischen weiteren Eingangsgrößen wie die Schienentemperatur T_s , Kühlschmiermenge und den Werkzeugstellgrößen leichter identifiziert werden. Hierbei soll eine vollfaktorielle Variation der Umfangsgeschwindigkeit im Bereich $v_s = 30 - 50$ m/s und der Zustellung im Bereich $a_e = 0,007 - 0,021$ mm bei gleich bleibender Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 22$ m/min erfolgen. Die Schienentemperatur wird dabei im Bereich von $- 60$ °C < T_s < 80 °C mit einem Inkrement $T_s = 20$ °C variiert. Nachfolgend erfolgt die Variation der Vorschubgeschwindigkeit v_f im Bereich von $v_f = 17 - 27$ m/min bei konstanten Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30$ m/s und Zustellung $a_e = 0,007$ mm.

4 Versuchsbedingungen und Messmethoden

Tabelle 4-2: Versuchsplanung der technologischen Untersuchungen zum Schienenschleifen

Prozessstellgröße	Angabe
Einfluss der Schienentemperatur	
Schienentemperatur T_s	- 60 °C; - 40 °C; - 20 °C; 0 °C; 20 °C; 40 °C; 60 °C; 80 °C
Umfangsgeschwindigkeit v_s	30 m/s; 40 m/s; 50 m/s
Zustellung a_e	0,007 mm; 0,014 mm; 0,021 mm
Vorschubgeschwindigkeit v_f	17 m/min; 22 m/min; 27 m/min
Kühlung	Trockenbearbeitung
Werkzeugstellgrößen	konstant
statistische Absicherung	zwei Wiederholungen je Parametersatz
Einfluss der Schmiermengen	
Schienentemperatur T_s	20 °C
Umfangsgeschwindigkeit v_s	30 m/s; 40 m/s; 50 m/s
Vorschubgeschwindigkeit v_f	17 m/min; 22 m/min; 27 m/min
Zustellung a_e	0,007 mm; 0,014 mm; 0,021 mm
Kühlung	Trockenbearbeitung; Schmierstoffbenetzung des Werkzeuges und der Schiene; Überflutungskühlung
Werkzeugstellgrößen	konstant
statistische Absicherung	zwei Wiederholungen je Parametersatz
Einfluss der Werkzeugstellgrößen	
Schienentemperatur T_s	20 °C
Umfangsgeschwindigkeit v_s	30 m/s; 40 m/s; 50 m/s
Vorschubgeschwindigkeit v_f	17 m/min; 22 m/min; 27 m/min
Zustellung a_e	0,007 mm; 0,014 mm; 0,021 mm
Kühlung	Trockenbearbeitung
Werkzeugstellgrößen	variabel; insgesamt 8 Werkzeugspezifikationen
statistische Absicherung	zwei Wiederholungen je Parametersatz
Einfluss der Hochleistungsschleifbearbeitung	
Schienentemperatur T_s	20 °C
Umfangsgeschwindigkeit v_s	30 m/s
Vorschubgeschwindigkeit v_f	17 m/min; 22 m/min; 27 m/min; 32 m/min; 37 m/min; 42 m/min; 47 m/min; 52 m/min; 57 m/min
Zustellung a_e	0,007 mm; 0,014 mm; 0,021 mm; 0,028 mm; 0,035 mm; 0,042 mm; 0,049 mm; 0,056 mm; 0,063 mm
Kühlung	Trockenbearbeitung
Werkzeugstellgrößen	konstant
statistische Absicherung	zwei Wiederholungen je Parametersatz

Bei der Untersuchung des Einflusses von variierenden Schmiermengen erfolgt der Vergleich der Trockenbearbeitung, der Kühlschmierstoffbenetzung des Schleifwerkzeuges und der Schiene sowie der Überflutungskühlung bei einem Volumenstrom $Q_{KSS} = 300 \text{ l/min}$. Die Kühlschmierstoffbenetzung des Schleifwerkzeuges und der Schiene wird in Form der gedrosselten Kopfrollenkühlung realisiert. Bei der Analyse des Einflusses der Werkzeugstellgrößen erfolgt die Variation der Schleifscheibenzusammensetzung, wobei Werkzeugstellgrößen Korngröße, Struktur sowie Sinterkorundanteil der Körnung systematisch untersucht werden. Hierzu kommen insgesamt acht unterschiedliche Werkzeugspezifikationen zum Einsatz, die in Kapitel 4.1.7 detailliert dargestellt sind. Im Rahmen der letzten Phase der technologischen Untersuchungen zum Schienenschleifen erfolgt die Analyse des Einflusses der Hochleistungsschleifbearbeitung. Dabei werden die Prozessstellgrößen Vorschubgeschwindigkeit v_f von $v_f = 17 \text{ m/min}$ bis auf $v_f = 57 \text{ m/min}$ und Zustellung a_e von $a_e = 0,007 \text{ mm}$ bis auf $a_e = 0,063 \text{ mm}$ separat voneinander erhöht. Dadurch werden bezogene Zeitspannungsvolumina $Q'_W = 2,57 - 23,1 \text{ mm}^3/\text{mms}$ abgedeckt. Im Mittelpunkt aller schleiftechnischen Untersuchungen steht die Ermittlung der signifikanten Einflussgrößen auf die Bearbeitungsergebnisse. Sämtliche Schleifversuche werden im Gegenlauf durchgeführt. Zur statistischen Absicherung der Versuchsergebnisse werden alle getesteten Kombinationen der Stellgrößen zwei Mal wiederholt.

Zur Bewertung des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen werden die Oberflächenkennwerte arithmetischer Mittelwert der Profilorдынaten R_a , mittlere größte Höhe des Profils R_z und Materialanteil R_{mr} (5 %; $-0,4 \mu\text{m}$) gemessen und analysiert. Die Qualifizierung der Randzonen im zerstörungsfreien Zustand findet anhand der Messung mikromagnetischer Kenngrößen statt. Die Randzonen werden des Weiteren exemplarisch im zerstörten Zustand anhand der lichtmikroskopischen Aufnahmen und der Analyse der Härtungstiefe CHD HV 0,3 an insgesamt 50 Schienensegmenten analysiert. Zur Beschreibung der Prozessinteraktionen werden die Prozesskenngrößen bezogene Schleifnormalkraft F'_n , bezogene Schleiftangentialkraft F'_t , kontakflächenbezogene Schleifleistung P''_c , kontakflächenbezogene Schleifenergie E''_c und spezifische Schleifenergie e_c gemessen bzw. berechnet.

4.2 Versuchsmaschine und -aufbau

Der Versuchsstand für die Einkornritz- und Schleifversuche ist auf Basis einer Plan- und Profilschleifmaschine Profimat MT 408 HTS der BLOHM JUNG GMBH, Hamburg, Deutschland, realisiert, [Bild 4-1](#). Die Maschine ermöglicht maximale Werkstückgeschwindigkeiten von $v_W = 180 \text{ m/min}$ bei maximalen Werkstückbeschleunigungen von $a_W = 50 \text{ m/s}^2$. Die hybridgelagerte Hochgeschwindigkeitsspindel mit einer maximalen Antriebsleistung von $P_{S, \text{max.}} = 45 \text{ kW}$ ermöglicht maximale Umfangsgeschwindigkeiten von $v_{s, \text{max.}} = 230 \text{ m/s}$. Zudem kann die Spindelleistung direkt aus der Maschinensteuerung ausgelesen und als zusätzlicher Kennwert verwendet werden. Im Spindelzapfen der Maschine sind ein Auswuchtsystem und Acoustic Emission Sensorik M5000 der DITTEL MESSTECHNIK GMBH, Landsberg am Lech, Deutschland, integriert. Diese erlauben eine Erreichung hoher Wuchtgüten sowie eine online-Überwachung des Schleifprozesses bzw. -werkzeuges.

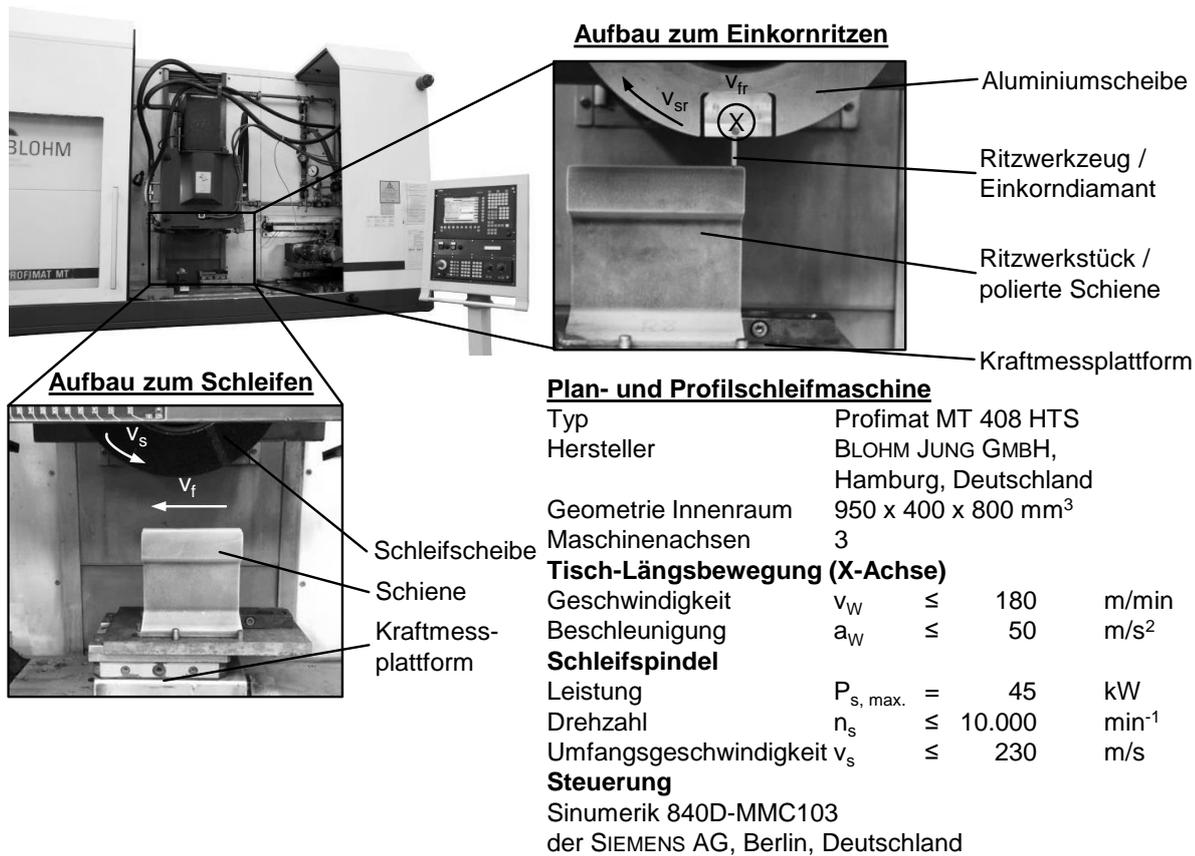


Bild 4-1: Plan- und Profilschleifmaschine Profimat MT 408 HTS der BLOHM JUNG GMBH, Hamburg, Deutschland

Die Maschine Profimat MT 408 HTS ist mit einer Steuerung Sinumerik 840D-MMC103 der SIEMENS AG, Berlin, Deutschland, ausgestattet. Die Maschine verfügt über zwei Abrichtsysteme: Einen rotierenden Abrichter für das continuous dressing (CD) sowie einen stehenden Abrichter, der auf dem Maschinentisch angebracht ist. Das Kühlsystem besteht aus einem Schwerkraft-Bandfilter SBF 390L der DGS-SYSTEM GmbH, Eigeltingen, Deutschland, sowie zwei Pumpen:

- Kreiselpumpe TH36/400 der K. H. BRINKMANN GmbH & Co. KG, Werdohl, Deutschland, für maximale Drücke von $p_{KSS, max.} = 12$ bar und Volumenströme von $Q_{KSS, max.} = 300$ l/min
- frequenzgeregelte Hochdruck-Schraubspindelpumpe TFS 364/40 der SKF LUBRICATION SYSTEMS GERMANY GMBH, Berlin, Deutschland, für maximale Drücke von $p_{KSS, max.} = 120$ bar und Volumenströme von $Q_{KSS, max.} = 9$ l/min

4.3 Vorgehensweise und Versuchsumgebung zur Schienentemperierung

Für das Erlangen von Erkenntnissen bzgl. des Einflusses der Schienentemperatur T_s auf die Bearbeitungsergebnisse des Schienenschleifens wurde der Versuchsstand zur reproduzierbaren Schienentemperierung unter Laborbedingungen entwickelt. Aus Sicherheitsgründen bzw. maschinenspezifischen Gründen ist die Realisierung einer In-Prozess-Bauteiltemperierung in einer Hochgeschwindigkeitsschleifmaschine nicht möglich. Aus diesem Grund wurden zwei externe Temperierungsumgebungen entwickelt und umgesetzt. Aufgrund der Komplexität dieser Aufgabenstellung wurde dabei methodisch nach der von Pahl/Beitz [FEL13] aufgestellten Arbeitsweise vorgegangen. Die durch die Norm [VDI 2221] definierte generelle Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren der Versuchsstände wurde berücksichtigt.

Zunächst wurde im Rahmen von Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung die Anforderungsliste an die Versuchsumgebung ausgearbeitet. Als Hauptanforderungen flossen vor allem der abzubildende Temperaturbereich $-60\text{ °C} < T_s < 80\text{ °C}$, eine hohe Reproduzierbarkeit beim Erreichen der Temperaturen, geringe Zeit der Temperierung sowie geeignete geometrische Abmessungen zur Temperierung der Schienensegmente mit Längen bis $l = 750\text{ mm}$ mit ein. Daraufhin wurden die notwendigen Funktionen und Strukturen des Systems beschrieben und eine zielgerichtete Suche nach Lösungsprinzipien durchgeführt.

Die Bewertung der Lösungsansätze für jeweilige Aufgabenstellungen erfolgte mithilfe der Nutzwertanalyse. Für die Umgebung zur Schienenkühlung wurden die Lösungsansätze Feststoffabkühlung mittels Trockeneis, Abkühlung mittels Wärmepumpeverfahren (Kältemaschine), Flüssigkeits- bzw. kryotechnische Abkühlung und die Kühlung mittels einer Labortiefkühltruhe betrachtet und bewertet. Aufgrund hoher Reproduzierbarkeit sowie des überschaubaren Aufwandes für Zeit und Kosten wurde der Lösungsansatz Kühlung mit einer Labortiefkühltruhe ausgewählt. Bei der Suche nach Lösungsansätzen für die Versuchsumgebung zur Schienenerwärmung wurden die induktive Erwärmung und Erwärmung in einem Trockenschrank als geeignet identifiziert und experimentell bewertet. Hierbei konnten beide Verfahren bei Zeiteinsatz und Handling/Mobilität überzeugen. Aufgrund wesentlich geringerer Investitionskosten wurde das Verfahren Erwärmung in einem Trockenschrank für die weiteren Arbeiten übernommen. Beide zur Schienentemperierung als geeignet qualifizierte Verfahren, die Kühlung in einer Labortiefkühltruhe und Erwärmung in einem Trockenschrank, können als Passivverfahren bezeichnet werden, da der Bediener nach der Einstückung keinen weiteren Einfluss auf die Bauteiltemperierung ausübt.

Labortiefkühltruhe zur Schienenkühlung

Zur Schienenkühlung vor der Schleifbearbeitung im Temperaturbereich von $-60\text{ °C} < T < 0\text{ °C}$ kommt eine Labortiefkühltruhe Frigor GLK 20 der VIBOCOLD A/S, Viborg, Dänemark, zum Einsatz, [Bild 4-2 a](#)). Die Arbeitsweise beruht auf thermoelektrischem Prinzip, dem der Peltier-Effekt zugrunde liegt. Dabei bewirkt der elektrische Strom die Veränderung des Wärmetransportes. In Abhängigkeit der Stromrichtung wird die Wärme entweder freigesetzt oder entzogen, was dazu führt, dass unterschiedliche Temperaturen erzielt werden. Die Labortiefkühltruhe besitzt eine elektronische Temperatursteuerung mit einer Temperaturab-

weichung $\Delta T = \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Der Innenraum der Labortiefkühltruhe mit Abmessungen $950 \times 450 \times 650 \text{ mm}^3$ erlaubt den Einsatz von Schienenlängen von $l \leq 940 \text{ mm}$. Eine gleichzeitige Temperierung von bis zu vier Schienensegmenten der Spezifikation S49 mit den genannten Längen ist möglich.

a)



Labortiefkühltruhe

Typ Frigor GLK 20
 Hersteller VIBOCOLD A/S, Viborg, Dänemark
 Innenraumabmessungen $850 \times 450 \times 650 \text{ mm}^3$
 Arbeitsprinzip Thermoelektrizität (Peltier-Effekt)

Parameter

Temperaturbereich $T = 0 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$
 Gewicht $m = 68 \text{ kg}$
 Temperaturabweichung $\Delta T = \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$

b)



Induktionsschrank

Typ T 5050 E
 Hersteller HERAEUS HOLDING GMBH, Hanau, Deutschland
 Innenraumabmessungen $750 \times 400 \times 350 \text{ mm}^3$
 Arbeitsprinzip Umluft

Parameter

Temperaturbereich $T = 0 \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$
 Gewicht $m = 56 \text{ kg}$
 Temperaturabweichung $\Delta T = \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
 Leistung $P = 2 \text{ kW}$

Bild 4-2: Versuchsumgebungen zur Schienentemperierung

- a) Labortiefkühltruhe Frigor GLK 20 der VIBOCOLD A/S, Viborg, Dänemark
- b) Trockenschrank T 5050 E der HERAEUS HOLDING GMBH, Hanau, Deutschland

Trockenschrank zur Schienenerwärmung

Zur Schienenerwärmung im Temperaturbereich von $40 \text{ }^\circ\text{C} < T < 80 \text{ }^\circ\text{C}$ wurde der Trockenschrank T 5050 E der HERAEUS HOLDING GMBH, Hanau, Deutschland, eingesetzt, Bild 4-2 b). Der Trockenschrank basiert auf dem Prinzip eines Umluft-Ofens, wonach die erhitzte Luft durch einen Ventilator in dem Innenraum schnell und gleichmäßig verteilt wird. Dieses Gerät hat eine hohe Leistung von $P = 2 \text{ kW}$, sowie eine hohe Maximaltemperatur von $T_{\text{max.}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$. Aufgrund der Innenabmessungen von $950 \times 400 \times 350 \text{ mm}^3$ können die Schienensegmente mit einer Länge von $l \leq 940 \text{ mm}$ im Trockenschrank temperiert werden. Analog zur Labortiefkühltruhe weist der Trockenschrank aufgrund eines relativ geringen Ge-

wichtiges von $m = 34 \text{ kg}$ eine gute Mobilität auf und kann an einen standardmäßigen Stromanschluss angeschlossen werden. Die Temperaturabweichung beträgt $\Delta T = \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

*Theoretische Betrachtungen und experimentelle Analysen
der temperaturabhängigen Geometrieänderungen von Schienen*

Die Schienenstähle, wie auch andere metallische Werkstoffe, unterliegen einer temperaturabhängigen Ausdehnung, die durch materialspezifische thermische Ausdehnungskoeffizienten beschrieben werden kann. Bei festen Werkstoffen kann dabei in der Regel zwischen dem Längenausdehnungskoeffizienten α und dem Volumenausdehnungskoeffizienten γ unterschieden werden. Die thermische Ausdehnung von isotropen Werkstoffen vollzieht sich gleichgerichtet in alle drei Raumrichtungen und kann somit vereinfacht über die Längenausdehnung, in die jeweilige Raumrichtung, beschrieben werden. Die genaue Kenntnis über das werkstoffspezifische Temperatúrausdehnungsverhalten ermöglicht es, auftretende Geometrieänderungen bereits in der Konstruktion von Bauteilen zu berücksichtigen. Weiterhin ist es notwendig, das temperaturabhängige Ausdehnungsverhalten zu beschreiben, im Fall wenn sich zu Beginn oder im Laufe eines Bearbeitungsprozesses ein Wärme- und/oder Abkühlprozess befindet. Dieser ändert nämlich die aus der Konstruktion bekannten Werkstückabmessungen nachhaltig und sollte im Vorfeld einer weiteren Bearbeitung bekannt sein. Die lineare Näherungsgleichung der Höhengausdehnung ΔH von isotropen Feststoffen setzt sich aus dem Produkt der Faktoren spezifischer Ausdehnungskoeffizient α , der Ausgangshöhe H_0 und der vorliegenden Temperaturänderung ΔT zusammen. Als Ergebnis daraus werden die Höhenänderung ΔH , Formel 4-1, bzw. die Höhengausdehnung ΔH , Formel 4-2, berechnet, die eine Differenz aus ausgedehnter Höhe, abzüglich der Ausgangshöhe, darstellt [BRE06].

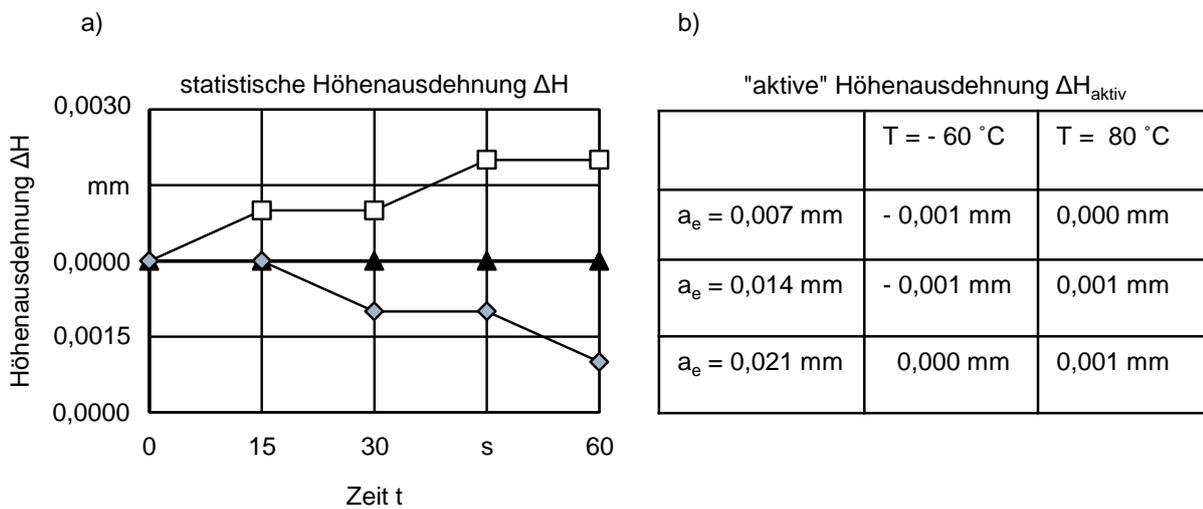
$$\Delta H = H - H_0 \quad (4-1)$$

$$\Delta H = \alpha \cdot H_0 \cdot \Delta T \quad (4-2)$$

Die Verifikation der ausgelegten Versuchsumgebungen zur Schienenkühlung und -erwärmung erfolgt anhand experimenteller Untersuchungen mit den versuchsähnlichen Schienensegmenten (Beschreibung im Kapitel 4.1.8), die auf unterschiedliche Temperaturen T_s gebracht und anschließend hinsichtlich des zeitabhängigen Ausdehnungsverhaltens sowie des Ausdehnungsverhaltens bei einer nachfolgenden Schleifbearbeitung analysiert wurden. Die Höhenänderungen ΔH von Schienen werden mit einem berührungslosen Wegmesssystem auf Wirbelstrombasis der Firma MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & Co. KG, Ortenburg, Deutschland, erfasst. In Bild 4-3 a) ist die zeitabhängige, im statischen Zustand gemessene, Höhenänderung ΔH der temperierten Schienensegmente dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich die Schienenhöhe H innerhalb eines Zeitraumes von $t = 60 \text{ s}$ um maximal $\Delta H = 0,002 \text{ mm}$ verändert. Hierbei dehnen sich die auf die Temperatur $T_s = -60 \text{ }^\circ\text{C}$ gebrachten Schienen aus, während kaum Schrumpfung an den bis auf Temperatur $T_s = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmten Schienen gemessen wird. Aufgrund der für die Schleifuntersuchungen vorgenommenen relativ hohen Vorschubgeschwindigkeiten $v_f = 10 - 57 \text{ m/min}$ in Kombination mit geringen Werkstücklängen $l = 140 \text{ mm}$ ergeben sich sehr kurze Werkstückeingriffszeiten von $t_{\text{Eingriff}} \approx 0,84 - 0,15 \text{ s}$. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die zeitabhängige, im statischen Zustand gemessene, Höhenveränderung $\Delta H \leq 0,002 \text{ mm/min}$ keinen signifikanten Einfluss auf die real ankommende Zustel-

lung a_e hat. Um dies auch noch für den Fall eines hochdynamischen Schienenschleifprozesses im Experiment aufzuzeigen, wird die „aktive“ Höhenveränderung ΔH_{aktiv} , Formel 4-3, analysiert. Dabei werden an Schienen die Schleifbahnen bis Mitte des Werkstückes geschliffen. Anschließend werden Höhen von hierdurch erzeugten Absätzen H_{Absatz} gemessen und mit der im Maschinenprogramm eingestellten Zustellung a_e gegenübergestellt. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Bild 4-3 b) gezeigt. Die gemessenen Werte der „aktiven“ Höhenveränderung ΔH_{aktiv} liegen im Bereich $\Delta H_{\text{aktiv}} \leq 0,001$ mm. Für den Fall des Einkornritzens ergeben die Messungen der Spurentiefe dass die geplante Ritzzustellungen $a_{er} = 0,001 - 0,015$ mm kaum durch die zeitabhängige Temperaturveränderung der Schienen beeinflusst werden. Damit wird die Funktionalität der neu entwickelten Versuchsumgebungen und der Vorgehensweise zur Schienentemperierung als geeignet bewertet.

$$\Delta H_{\text{aktiv}} = a_e - H_{\text{Absatz}} \quad (4-3)$$



Ausgangstemperatur der Schiene

- ▲ T = 20 °C
- T = - 60 °C
- ◆ T = 80 °C

Werkstück / Schiene

gerade Vignolschiene S49
 VOESTALPINE AG
 Stahl R260
 l = 140 mm

Versuchsumgebung zur Schienentemperierung

Labortiefkühltruhe Frigor GLK 20
 VIBOCOLD A/S, Viborg
 Trockenschrank T 5050 E
 HERAEUS HOLDING GMBH

Messung der Höhenveränderung ΔH

Wirbelstrom Wegmesssystem
 MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & Co. KG

Bild 4-3: Zeitabhängiges Schrumpf- bzw. Dehnverhalten temperierter Schienen

4.4 Werkzeuge und Werkstücke

Ritzwerkzeuge

Beim Einkornritzen wird die Analyse der Spanbildungsmechanismen am Werkstück fokussiert. Hierbei soll die Tatsache Berücksichtigung finden, dass innerhalb einer Charge konventioneller Ritzkörner gleicher Spezifikation trotzdem beträchtliche Schwankungen der Form und der Maße vorliegen können. Bei den Ritzversuchen soll der Verschleiß der Kornschneiden einen möglichst geringen Einfluss haben, weshalb Diamant als Schneidwerkstoff für die Ritzwerkzeuge zum Einsatz kommt. Diamant wird in der produktiven Bearbeitung von Stahl aufgrund der Affinität des Diamant-Kohlenstoffs zu Eisen und des damit einhergehenden erhöhten chemischen Verschleißes sowie der möglichen Grafitisierung nicht als Kornwerkstoff eingesetzt. Da bei den Ritzversuchen durch die vergleichsweise geringen Spannungsvolumina und Eingriffsdauer jedoch keine dafür kritischen Temperaturen von $T = 900 - 1.400 \text{ °C}$ zu erwarten sind, bietet sich der Diamant als sehr verschleißarmer Kornwerkstoff an. Der Erkenntnisgewinn bzgl. der Spanbildungsmechanismen bei unterschiedlich temperierten Werkstücken wird daher als sehr hoch eingeschätzt, wie Untersuchungen von u. a. GIWERZEW [GIW03] und PRINS [PRI72] zeigen, die ihre Ritzversuche auch mit dem Diamantkorn an metallischen Werkstoffen durchgeführt haben.

Das Ritzwerkzeug wird dabei in eine Fassung aus Aluminium geschraubt, die je nach Ausführung ein bis zwei Ritzwerkzeuge aufnehmen kann und ihrerseits in einen Aluminiumgrundkörper mit einem Durchmesser $d_r = 295 \text{ mm}$ eingebracht ist. Der Grundkörper bildet zusammen mit dem Werkzeughalter und dem Ritzwerkzeug die Ritzscheibe zusammen. Als Ritzwerkzeuge werden Einkornabrichter aus Naturdiamant der Spezifikation K-EA21-Q3 der DR. KAISER DIAMANTWERKZEUGE GMBH & CO. KG, Celle, Deutschland, verwendet, die sich an einem Halter mit Abmessungen $5 \times 0,5 \text{ mm}^2$ befinden, [Bild 4-4](#). In der Spitze des Schafts ist ein Naturdiamant mit einer Pyramidenform eingelötet. Der mittlere Durchmesser des Einkorndiamantes liegt im Bereich $d_{kg} = 0,7 - 0,8 \text{ mm}$ und stimmt somit annähernd mit der Korngröße der Analogie-Schleifwerkzeuge überein.

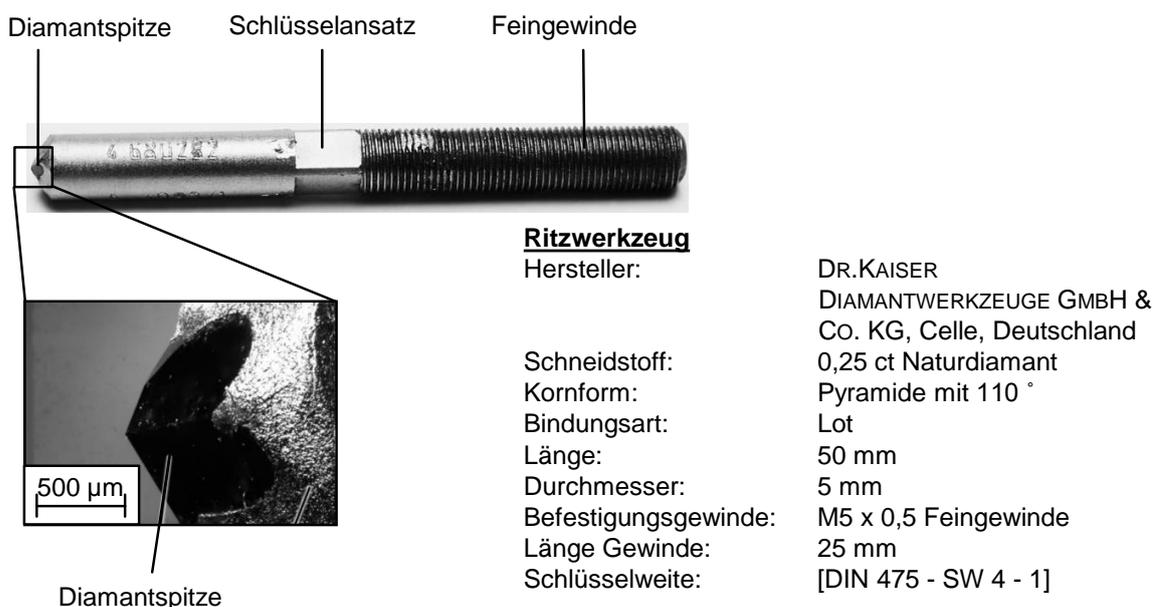


Bild 4-4: Ritzwerkzeug der DR. KAISER DIAMANTWERKZEUGE GMBH & CO. KG, Celle, Deutschland

Schleifwerkzeuge

Für technologische Untersuchungen zum Schienenschleifen kommen insgesamt acht Spezifikationen von zylindrischen, kunstharzgebundenen Korundscheifwerkzeugen mit Abmessungen 300 x 30 x 127 mm³ zum Einsatz. Die Schleifwerkzeuge wurden durch die Firma STELLA KERAMIK, Schwarzenbach an der Saale, Deutschland, hergestellt. In Tabelle 4-3 sind Spezifikationen der eingesetzten Schleifwerkzeuge dargestellt. Dabei wird das unter der Spezifikation 1 aufgeführte Werkzeug als Standardwerkzeug für die technologischen Untersuchungen zum Einfluss variierender Schienentemperaturen, Schmiermengen und der Hochleistungsschleifbearbeitung verwendet, während die unter den Nummern 2 bis 8 aufgeführten Schleifwerkzeuge ausschließlich in der Versuchsreihe zur Untersuchung des Einflusses variierender Werkzeugstellgrößen eingesetzt wurden. An den Schleifwerkzeugen werden insgesamt drei Stellgrößen variiert: Die Korngröße variiert im Bereich 16 - 24 Mesh, der Struktur-Zahlenwert beträgt 4 oder 8 sowie an zwei Werkzeugspezifikationen wird die Variation des Anteils des Sinterkorundes von 15 % und 30 % vorgenommen. Die eingesetzten Schleifwerkzeuge werden im Neuzustand sowie im Laufe des Einsatzes nach definierten Spannungsvolumina $V_w = 940,8 \text{ mm}^3$ systematisch abgerichtet.

Tabelle 4-3: Schleifwerkzeugspezifikationen für technologische Untersuchungen zum Schienenschleifen

Nr. Spezifikation – Hersteller	Form und Abmessungen	Schneidstoff	Korngröße nach FEPA / d_{kg} [mm]	Struktur	Bindung, Härte
1 – Stella Keramik	zylindrisch 300 x 30 x 127 mm ³	100 % Schmelzkorund	16 / 1,30	4	Kunstharz, hochhart (Q)
2 – Stella Keramik	zylindrisch 300 x 30 x 127 mm ³	100 % Schmelzkorund	16 / 1,30	8	Kunstharz, hochhart (Q)
3 – Stella Keramik	zylindrisch 300 x 30 x 127 mm ³	100 % Schmelzkorund	20 / 1,10	4	Kunstharz, hochhart (Q)
4 – Stella Keramik	zylindrisch 300 x 30 x 127 mm ³	100 % Schmelzkorund	20 / 1,10	8	Kunstharz, hochhart (Q)
5 – Stella Keramik	zylindrisch 300 x 30 x 127 mm ³	100 % Schmelzkorund	24 / 0,78	4	Kunstharz, hochhart (Q)
6 – Stella Keramik	zylindrisch 300 x 30 x 127 mm ³	100 % Schmelzkorund	24 / 0,78	8	Kunstharz, hochhart (Q)
7 – Stella Keramik	zylindrisch 300 x 30 x 127 mm ³	85 % Schmelzkorund 15 % Sinterkorund	20 / 1,10	4	Kunstharz, hochhart (Q)
8 – Stella Keramik	zylindrisch 300 x 30 x 127 mm ³	70 % Schmelzkorund 30 % Sinterkorund	20 / 1,10	4	Kunstharz, hochhart (Q)

Ritzwerkstücke

Bei der Auslegung und Vorbereitung der Ritzwerkstücke wird das Ziel verfolgt, plane Oberflächen mit sehr geringen Oberflächenkennwerten und Abweichungen von der Ebenheit der Oberfläche zu erzeugen. Dadurch können schmale Ritzspuren eindeutig identifiziert und hinsichtlich ihrer Geometrie bewertet werden. Die Ritzwerkstücke werden analog zum Schleifen aus den Schienensegmenten des Profils S49, Werkstoff Stahl R260, mit einer Länge von

$l = 140$ mm hergestellt, Bild 4-5. Die Ritzflächen sind dabei spiegelpolierte Oberflächen mit Abmessungen 60×140 mm und weisen Oberflächenkennwerte von $R_a \approx 0,10 \mu\text{m}$, $R_z \approx 0,75 \mu\text{m}$ und $R_{mr} (5\%; -0,25 \mu\text{m}) \approx 63,3\%$ auf. Die Herstellung der Ritzflächen erfolgte in mehreren Schritten: Zunächst werden die gewünschten Geometrien der Proben grob durch das Planfräsen erzeugt, danach werden diese unter Verwendung feinkörniger Korundschleifscheiben maschinell geschliffen und abschließend werden die Ritzproben maschinell und manuell poliert. Damit sich die nacheinander erzeugten Ritzspuren möglichst nicht gegenseitig beeinflussen, beträgt der Ritzspurabstand $1,5$ mm.

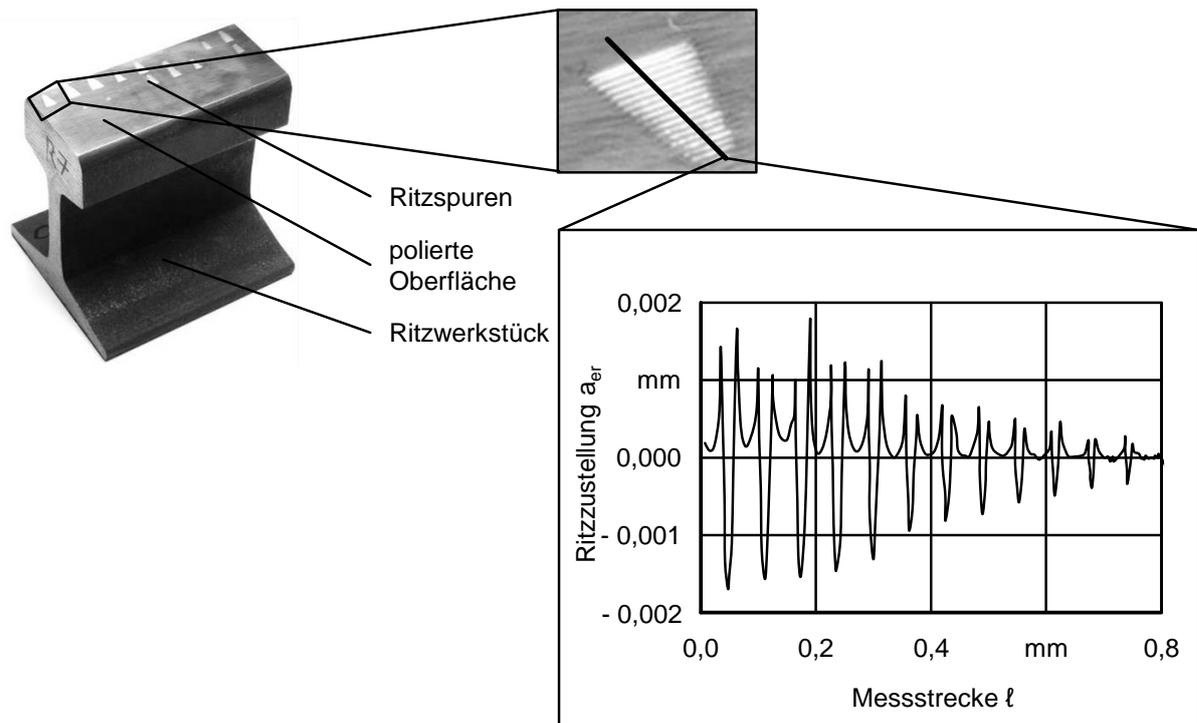


Bild 4-5: Werkstücke für das Einkornritzen der VOESTALPINE AG, Linz, Österreich

Schienen

Als Werkstücke werden neue, nicht kopfgehärtete Vignolschienen des Profils S49 aus nicht legiertem Kohlenstoff-Mangan Stahl R260, Werkstoffnummer 1.0623, eingesetzt, die nach Norm [DIN 13674] spezifiziert sind. Die Schienen werden durch die VOESTALPINE AG, LINZ, ÖSTERREICH, hergestellt. Der Schienenstahl hat Mangan und Chrom als Hauptlegierungselemente. Die genaue Zusammensetzung des Werkstoffes kann aus Tabelle 2-1 entnommen werden. Der Werkstoff Stahl R260 wird üblicherweise auf den geraden Strecken im Ort- Nah- und Fernverkehr eingesetzt. Die Länge der Schienensegmente beträgt $l = 140$ mm. Das Schienenmaterial wird durch den Verkehrsbetreiber BERLINER VERKEHRSBETRIEBE AÖR (BVG), Berlin, Deutschland, auf zahlreichen U-Bahn-Abschnitten eingesetzt. Aufgrund der profilspezifischen Konizität des Schienenkopfes 1:40 war es bei einem Längsumfangs-Planschleifen mit relativ geringen Eingriffsbreiten sowie der nicht konstanten Tiefe der veränderten Randzone z zu rechnen. Um dieser Tatsache entgegen zu kommen, wird an Werkstücken ein planer Steg mit Abmessungen $140 \times 20 \times 2$ mm³ erzeugt, Bild 4-6. Bei den Schleifversuchen wird dieser Steg über konstante Breite überschleifen. Dies führt zu konstanten, vorhersagbaren Schleifeingriffsbedingungen.

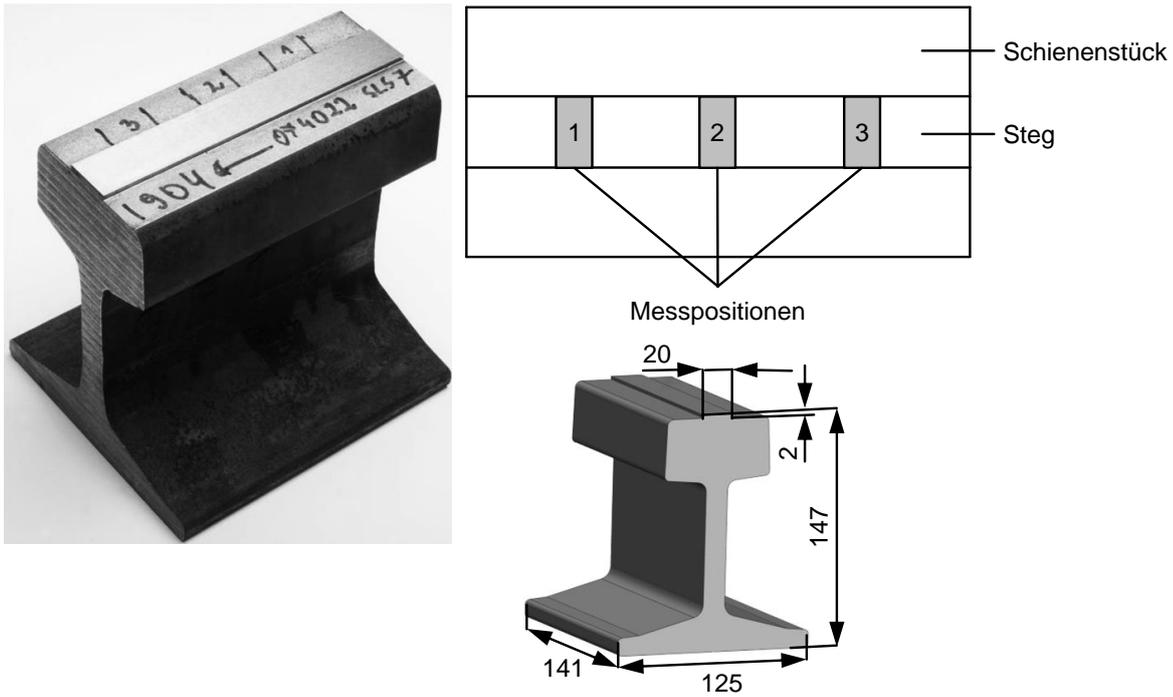


Bild 4-6: Werkstücke für technologische Untersuchungen zum Schienenschleifen der VOESTALPINE AG, LINZ, ÖSTERREICH

Die Schienenrandzonen werden im Vorfeld hinsichtlich des Gefüges und der Härtungstiefe analysiert, [Bild 4-7](#). Die Randzonen weisen ein feinkörniges perlitisches Gefüge auf, keine Aufhärtungen randzonennaher Schicht sind vorhanden. Durchgeführte Messungen der mechanischen Eigenschaften haben Zugfestigkeiten von 800 - 1000 N/mm² und Härten nach Vickers HV 0,3 = 260 - 320 als Ergebnis ergeben. Die Schienenrandzonen weisen des Weiteren eine gute Homogenität auf.

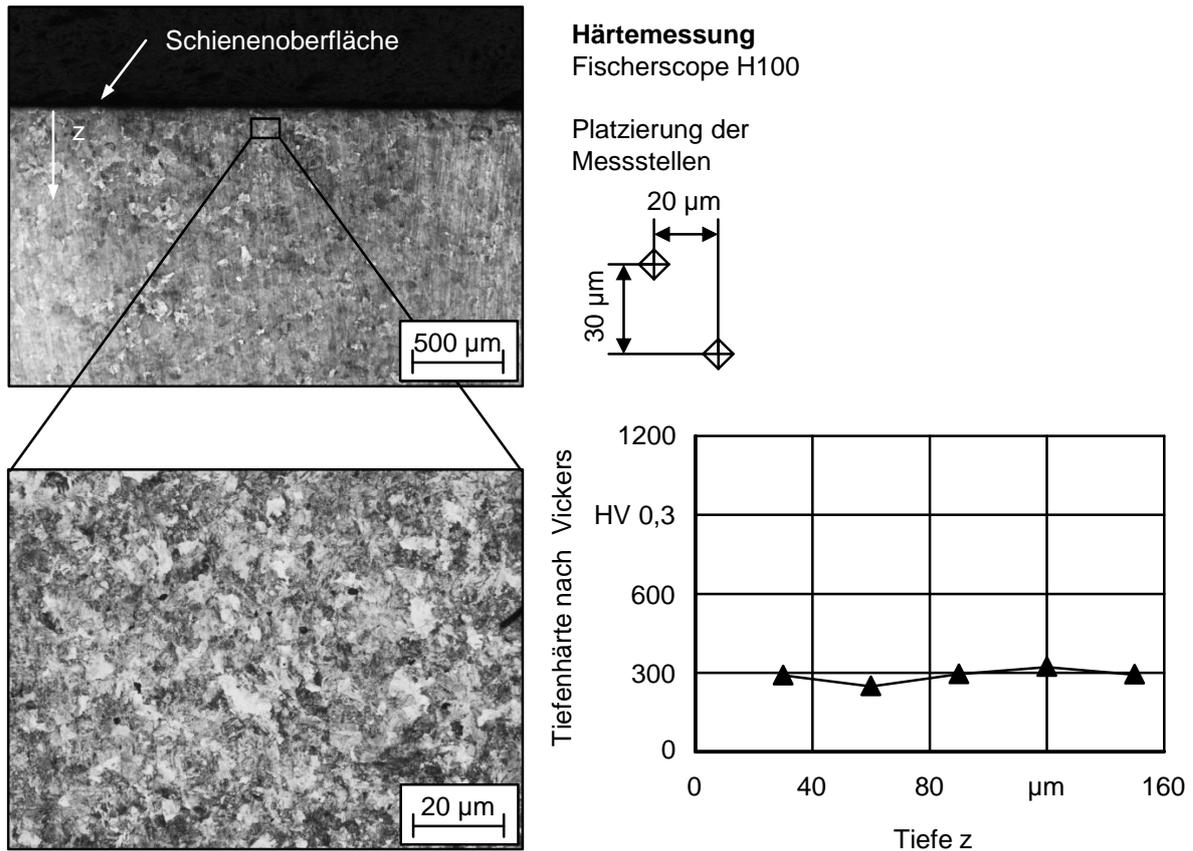


Bild 4-7: Gefügebeschaffenheit des Werkstoffes Stahl R260

4.5 Mess- und Analysevorrichtungen

Bestimmung der Schienentemperatur

Zur Bestimmung der Schienentemperatur T_s werden die Thermoelemente des Typs K, bestehend aus einer Nickel-Chrom-Legierung, eingesetzt. Die Thermoelemente weisen eine Empfindlichkeit von $40 \mu\text{m}$ auf und befinden sich in einem Edelstahlmantel, der diese vor Bruch und Beschädigung schützt. Die Thermoelemente bestehen aus zwei unterschiedlichen Materialien, die elektrisch miteinander verbunden sind. Die dazwischen liegende Spannung wird von der Temperatur der Schiene beeinflusst und anschließend in ein Messergebnis umgewandelt. Das Thermoelement Typ K wird an ein Multimeter der GOSSEN METRAWATT GMBH, Nürnberg, Deutschland, angeschlossen und ermöglicht einen Messbereich von $-70 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+800 \text{ }^\circ\text{C}$. Der messbare Temperaturbereich deckt den zu untersuchenden Bereich demnach voll ab. Die Auflösungsstufe ist bis einer Temperatur von $400 \text{ }^\circ\text{C}$ in $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ Schritten möglich [GOST 26614]. Der Messfühler des Thermoelements ist als feiner Messdraht ausgeführt und erlaubt Messungen auf ebenen Flächen, aber auch an und in komplexen Geometrien. Zur Verifikation der Thermoelement-Messungen kam des Weiteren eine Thermografiekamera der INFRA TEC GMBH, Dresden, Deutschland, [Bild 4-9 b](#)), zum Einsatz. Das kontaktlose Messverfahren trennt das Messmittel und den Messgegenstand räumlich voneinander und ermöglicht somit eine gefahrlose Messung. Die Thermografiekamera hat einen Einsatzbereich von $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+1.500 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine Messgenauigkeit von $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Zerspankraft

Zur Charakterisierung der Schienenschleifprozesse und dem darauf folgenden Ableiten der Leistungs- und Energiekenngrößen werden Schleifkräfte gemessen. Für die Messung der Schleifnormal- F_n und Schleiftangentialkräfte F_t wird die Kraftmessplattform 9257B der KISTLER AG, Winterthur, Schweiz, mit vier 3-Komponenten-Kraftsensoren mit jeweils drei Quarzkristall-Plattenpaaren, genutzt, Bild 4-9 a). Die Kraftmessplattform hat einen Messbereich von -15.000 bis 15.000 N. Die Datenerfassung der Kraftmess- und der AE-Signale erfolgt mit der graphischen Umgebung LabVIEW™ Version 8.5 der NATIONAL INSTRUMENTS, Austin, USA. In Bild 4-8 sind die Rohmessschriebe von Kraftmessungen eines Einkornritz- und Schleifversuches dargestellt. Die Weiterverarbeitung der gemessenen Signale wird mit dem Programm Matlab® der MATHWORKS INC., Natick, USA, durchgeführt.

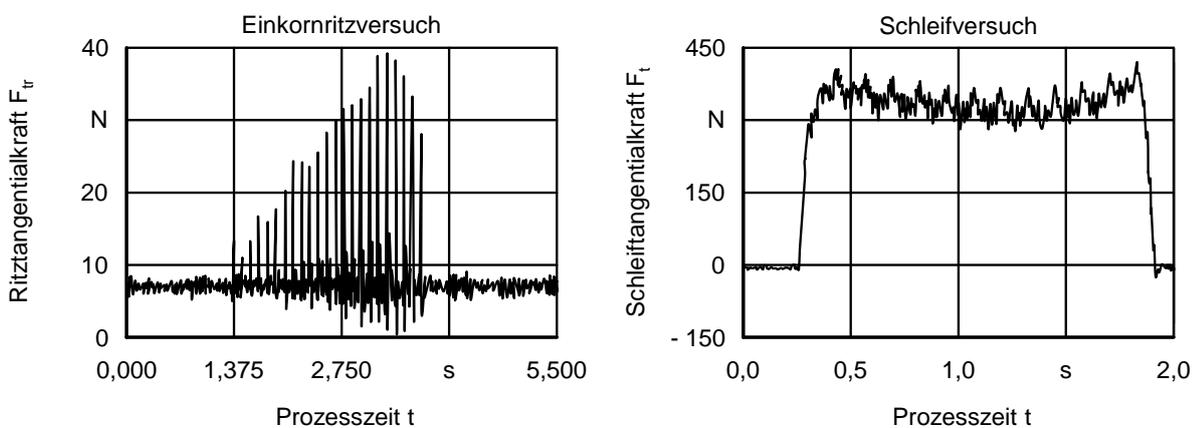


Bild 4-8: Messschriebe der Kraftmessungen bei Einkornritz- und Schleifversuchen

Zerstörungsfreie Messung der Randzonenparameter

Zur zerstörungsfreien Qualifizierung des Randzonenzustandes an Schienen wird die Messtechnik 3MAI des FRAUNHOFER IZFP, Saarbrücken, Deutschland, eingesetzt, dessen Wirkprinzip auf dem Phänomen des Mikromagnetismus beruht. Aufgrund des Innovationsgrades des Gerätes und einem großen Potenzial für deren Einsatz bei realen Schieneninstandhaltungsvorgängen, wird dieses Verfahren detailliert im Kapitel 5 behandelt.

Oberflächenkennwerte

Zur Bestimmung der Oberflächenqualität wird das taktile Messgerät Marsurf M300 C-Set der MAHR GMBH, Berlin, Deutschland, Bild 4-9 c), eingesetzt. Das Gerät hat einen Messbereich von 350 μm . Die Messungen werden bei einer konstanten Anpresskraft $F_a = 0,75 \text{ mN}$ durchgeführt. Als Tastspitze wird eine 2 μm -Diamantspitze verwendet. Mithilfe des Gerätes werden Oberflächenkennwerte arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten R_a , maximale Höhe des Profils R_z sowie Materialanteil R_{mr} (5 %; - 0,4 μm) gemessen.

Randzonengefüge und Tiefe der thermisch veränderten Randzone

Die optische Bewertung der Materialstruktur von geschliffenen bzw. tribologisch beanspruchten Schienen erfolgt mit einem Lichtmikroskop BX51 von OLYMPUS OPTICAL CO. LTD, Shinjuku, Japan, [Bild 4-9 d](#)). Das Gerät ermöglicht die Qualifizierung der Tiefe thermisch veränderter Randzone z sowie eine visuelle Analyse des Gefügezustandes. Das Lichtmikroskop ermöglicht Vergrößerungen von 25 Fach bis 500 Fach bei einer Auflösung der verwendeten Kamera von 2.080×1.544 Pixeln. Die eingesetzte Software, Analysis Pro, zur Steuerung des Mikroskops und des integrierten Koordinatentisches, ermöglicht das Zusammensetzen mehrerer Aufnahmen, um einen größeren Tiefenschärfebereich abzudecken, das so genannte Extended Focal Imaging (EFI). Die Probenherstellung / -vorbereitung zur Durchführung von Gefügeanalysen beinhaltet das Herauserodieren der Segmente mit Abmessungen $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$, deren nachfolgendes Warmeinbetten bei Temperaturen $T \approx 200 \text{ °C}$ in die Bakelit-Einbettmasse mittels einer Warmeinbettpresse Opal 450H der ATM GMBH, Mammelzen, Deutschland, sowie das anschließende Überschleifen und Polieren von Proben mithilfe des Schleif- und Polierkopfes Rubin 520 der ATM GMBH, Mammelzen, Deutschland.

Kraftmessplattform 9257B



Thermografiekamera InfraTec



Lichtmikroskop BX51

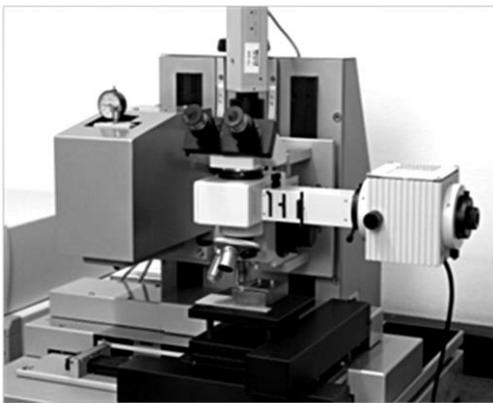


Oberflächenmessgerät Marsurf M300 C-Set

**Bild 4-9:** Messmittel für Prozessanalyse und Beurteilung des Bearbeitungsergebnisses

Mikrohärte

Die Bestimmung der Mikrohärte wird mithilfe des Messsystems Fischerscope H100C der HELMUT FISCHER GMBH, Sindelfingen-Maichingen, Deutschland, [Bild 4-10](#), automatisiert nach [DIN EN ISO 14577] durchgeführt. Die Messungen erfolgte nach Vickers-Verfahren, wofür eine vierseitige Diamantpyramide mit dem Flächenwinkel von 136° in die Oberfläche der Proben bei einer Prüfkraft $F_a = 0,4 - 1000$ mN eingedrückt wird. In das System ist das Lichtmikroskop mitintegriert, sodass eine genaue Bestimmung der zu vermessenden Bereiche und erzeugter Eindrücke möglich ist. Während der Messung werden die Eindringtiefe sowie die Prüfkraft des Prüfkörpers aufgezeichnet. Aus der Eindringhärte wird die Vickers-Härte HV nach [DIN EN ISO 14577] ermittelt. Das Gerät ist mit der Software WINHCU[®] ausgestattet, die computergesteuerte Ansteuerung der Diamantpyramide sowie Auswertung von Messergebnissen ermöglicht.



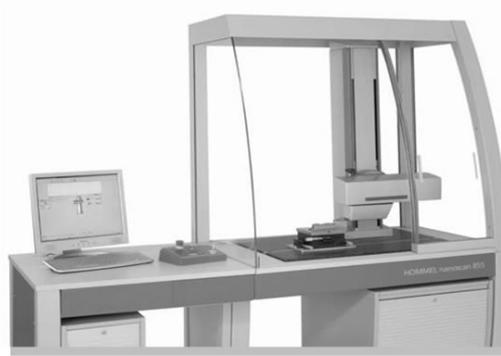
Mikrohärtemessgerät

Typ	Fischerscope H100C		
Hersteller	HELMUT FISCHER GMBH, Sindelfingen-Maichingen, Deutschland		
Messprinzip	Vickers		
Prüfkörper	4-seitige Diamantpyramide		
Flächenwinkel	136°		
Verfahrweg des Tisches	50 x 50 mm ²		
Parameter			
Prüfkraft	F	=	0,4 ... 1.000 mN
Auflösung der Prüfkraft	ΔF	=	0,2 μ m
max. messbare Härte	HV	=	120.000 N/mm ²

Bild 4-10: Mikrohärtemessgerät Fischerscope H100C
der HELMUT FISCHER GMBH, Sindelfingen-Maichingen, Deutschland

Bestimmung der Ritzspurengeometrie

Die Messung der Ritzspuren erfolgt mit dem taktilen Rauheits- und Konturmessgerät nano-scan 855 der HOMMEL ETAMIC GMBH, Villingen-Schwenningen, Deutschland, [Bild 4-11](#). Das Messgerät ist dank der Verwendung eines hochgenauen, optomechanischen Messsystems in der Lage, sowohl Rauheits- als auch Konturvermessungen an geneigten und gekrümmten Oberflächen mit einer Auflösung bis zu 0,6 nm bei einem gleichzeitig großen Messbereich in Form einer Tastlänge von Versuchsbedingungen und Messtechnik 200 mm durchzuführen. Für die Messungen wird ein Messtaster mit einer Diamantspitze verwendet, die einen Tastspitzenradius von 5 μ m und einen Tastspitzenwinkel von 60° aufweist. Die gemessene Taststrecke beträgt 1,2 mm, wobei Messpunkte in einem Abstand von 0,5 μ m platziert werden. Die Taststrecke wird quer zur Ritzspur mit einer Geschwindigkeit von 0,1 mm/s abgefahren.



Oberflächentopographiemessgerät

Typ Nanoscan 855
 Hersteller HOMMEL ETAMIC GMBH,
 Villingen-Schwenningen,
 Deutschland

Messprinzip taktile Messung
 Tastspitze Diamant
 Topographievermessung 2D, 3D

Parameter

Messbereich	24	µm
Auflösung	0,6	mN
Tastarmlänge	90	mm
Radius der Tastspitze	2	µm
Antastkraft	bis 50	mN

Bild 4-11: Taktiles Oberflächentopographiemessgerät
 nanoscan 855 der HOMMEL ETAMIC GMBH, Villingen-Schwenningen, Deutschland

Bestimmung porenvolumetrischer Zusammensetzung der Schleifwerkzeuge

Zur Analyse der porenvolumetrischen Zusammensetzung der Schleifwerkzeuge kommt das Messgerät Metrotom 800 der CARL ZEISS AG, Oberkochen, Deutschland, zum Einsatz, dessen Wirkprinzip auf der Röntgen-Computertomographie (CT) beruht. Das CT-Messverfahren stellt eines der Standardmessverfahren zur Analyse von Topographien und volumetrischen Zusammensetzungen der Schleifwerkzeugen dar. Bei der Vermessung wird eine Mehrzahl an Schnittbildern erzeugt, die anschließend computerbasiert zusammengeführt werden und Aussagen über die 3D-Topographie des Prüfobjektes liefern. In [Bild 4-12](#) sind das Messgerät und das Messprinzip dargestellt. Die Auswertung gemessener Daten erfolgt mithilfe der Software Volume Graphics, die es ermöglicht, die volumenbezogenen Anteile von unterschiedlichen Werkstoffen bzw. leeren Bereichen ausgeben zu lassen. Zur Vermessung werden einzelne Segmente mit den Abmessungen $20 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$ aus den Schleifwerkzeugen herausgerodiert und jeweils drei Mal vermessen.

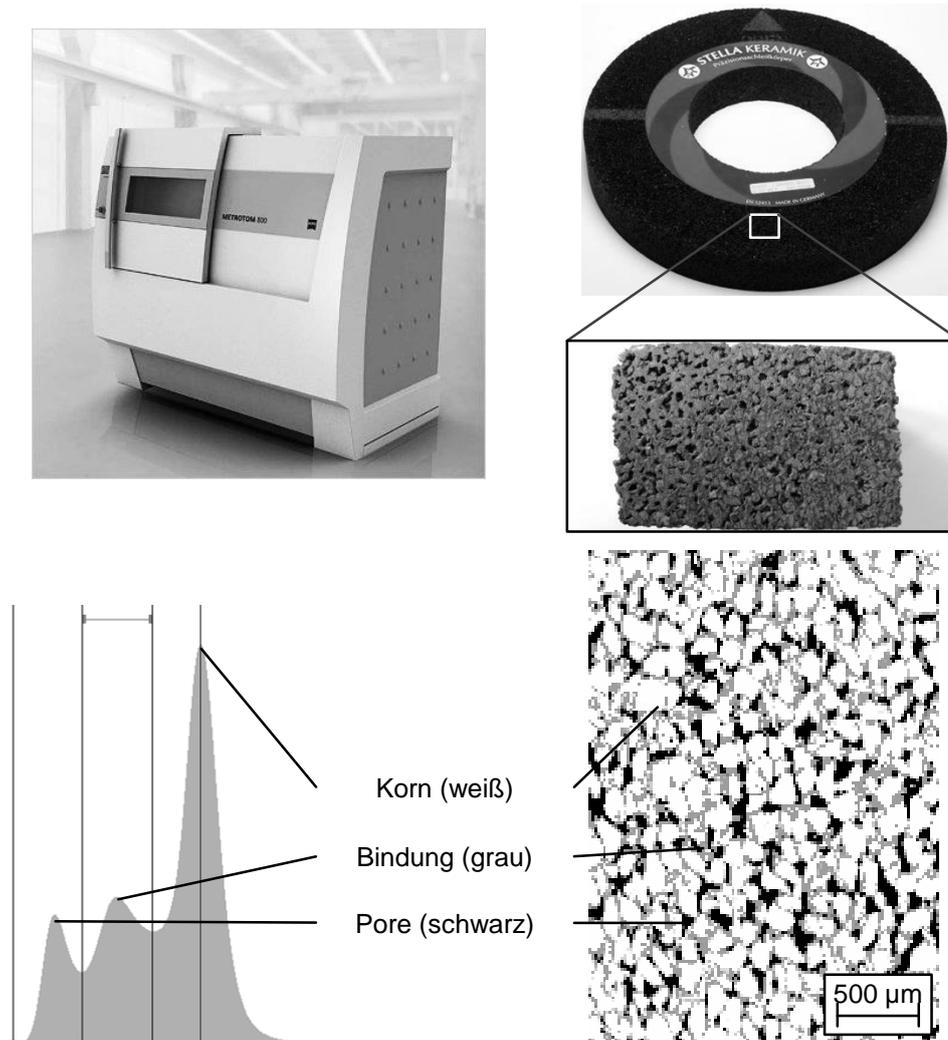


Bild 4-12: CT-Messgerät Metrotom 800 der CARL ZEISS AG, Oberkochen, Deutschland

4.6 Auswerte- und Modellierungsmethodik

Anschließend an die wesentlichen technologischen Untersuchungen erfolgt auf Basis erzielter technologischer Zusammenhänge die Entwicklung deskriptiver Prozessmodelle. Das primäre Ziel der Modellbildung besteht darin, den Zusammenhang zwischen den untersuchten Eingangsgrößen, wie z. B. Schienentemperatur oder Prozessstellgrößen, auf die Ausgangsgrößen zu beschreiben. Die Spezifik der deskriptiven Prozessmodelle besteht darin, dass diese aufbauend auf empirischen Daten erarbeitet werden und tendenziell eine gute Vorhersage bestimmter Zielgrößen liefern. Der ausgewählte Modellierungsansatz gilt ausschließlich für den Bereich der experimentellen Versuche. In den untersuchten Fällen sind alle Eingangsgrößen unter einander unabhängig. Daher wird die multiple lineare Regressionsanalyse (MLR) als Lösungsansatz gewählt. Die MLR ist unter anderem in den Arbeiten von FAHRMEIR [FAH09], DETHLEFS [DET16] und KRETZSCHMAR [KRE16] ausführlich erläutert. Demnach ist durch Formel 4-4 die MLR für beispielsweise vier Eingangsgrößen beschrieben. Hierbei entsprechen Y den abhängigen Größen bzw. den Ausgangsgrößen. Diese sind im vorliegenden Fall die Prozesskennwerte bzw. die Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses. Die x_i entsprechen den unabhängigen Variablen. Die Koeffizienten bzw. der Achsenabschnitt

sind mit β_i und die Differenz zwischen der Vorhersage und dem tatsächlich gemessenen Wert als Fehler ε bezeichnet. Alle MLR wurden unter Verwendung eines quadratischen Modellansatzes erarbeitet. Die Lösung von den überbestimmten linearen Gleichungssystemen erfolgt daraufhin nach der Methode der kleinsten Quadrate mithilfe der Software Minitab, MINITAB INC., State College, USA. Um die Signifikanz der einzelnen unabhängigen Eingangsgrößen, der Wechselwirkungen erster Ordnung und der quadratischen Anteile zu bestimmen, können die durch die eingesetzte Software ausgegebenen p-Werte verwendet werden. Dabei werden alle Messwerte im Vorfeld auf die gleiche Skala normiert. Zur besseren Einschätzung der Signifikanz der Eingangsgrößen wird mit vier Signifikanzstufen gearbeitet:

- höchstsignifikant ($p > 99,9 \%$)
- hochsignifikant ($p > 99,0 \%$)
- signifikant ($p > 95,0 \%$)
- nicht signifikant ($p < 95,0 \%$)

Zusätzlich erfolgt die experimentelle Verifikation der so erarbeiteten Modelle wofür zusätzliche Verifikationsversuche vorgesehen werden. Für jedes Modell werden mindestens drei Verifikationspunkte durchgeführt. Die erzielten empirischen Daten werden diesen aus den Modellen gegenübergestellt und auf dieser Basis die Aussagekraft des Modells ermittelt.

$$\begin{aligned}
 Y &= \text{Funktion der Zielgröße} \\
 b_0 &\text{ Konstante} \\
 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 &\text{ lineare Faktorwirkung} \\
 + b_5 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_6 \cdot x_1 \cdot x_3 + b_7 \cdot x_1 \cdot x_4 &\text{ lineare Faktorwechselwirkungen} \\
 + b_8 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_9 \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{10} \cdot x_3 \cdot x_4 & \\
 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{12} \cdot x_2^2 + b_{13} \cdot x_3^2 + b_{14} \cdot x_4^2 &\text{ quadratische Faktorwechselwirkungen} \quad (4-4)
 \end{aligned}$$

5 Messverfahren und -vorgehensweise zur zerstörungsfreien Qualifizierung von Schienen- randzonen mithilfe mikromagnetischer Kenngrößen

Die Qualität der Schienenfahrfläche und -randzone soll sowohl während des Streckenbetriebes in regelmäßigen Abständen als auch nach dem Schleifvorgang analysiert und bewertet werden. Die Vermessung mechanischer Kenngrößen, wie beispielsweise Zugfestigkeit, Streckgrenze oder Härte ist nur zerstörend möglich und in entsprechenden Prüfvorschriften geregelt. Eine quantitative Bewertung des Gefügestandes hinsichtlich seines Einflusses auf die mechanischen Eigenschaften erfolgt üblicherweise durch die Analyse von Werkstoffproben mithilfe lichtoptischer oder transmissionselektronenmikroskopischer Methoden. Wie im Stand der Forschung dargelegt, werden zerstörungsfreie Messverfahren auf Basis von Wirbelstrom- und Ultraschallmessung im Bereich der Schieneninfrastruktur zwar eingesetzt, erlauben jedoch ausschließlich die Identifikation von äußeren Fehlern, wie beispielsweise Ermüdungsrisse, Riffel, Welligkeiten.

Bei anderen Anwendungen aus dem Gebiet der Produktionstechnik, die eine Qualifizierung der Randzonenzustände nach der mechanischen Bearbeitung erfordern, werden immer öfter die Magnetisierungsverfahren eingesetzt. Voraussetzung dabei ist die metallische Struktur des zu messenden Bauteils. Ein solches Verfahren stellt die 3MAII-Prüftechnik dar. Im Rahmen des Kapitels wird das 3MAII-Verfahren hinsichtlich der Eignung zur quantitativen Bewertung des Randzonenzustandes von Schienen analysiert.

Randzonenkennwerte zur Qualifizierung der Schienenrandzone nach dem Schleifen

Wie die Arbeiten von UHLMANN [UHL14b, UHL15a, UHL15b, UHL16] zeigen, kann das Schienenschleifen zu Aufhärtungen in der Randzonenschicht führen. Dabei steigt die Mikrohärtigkeit im randzonennahen Bereich um bis zu einem Faktor von 3,5 im Vergleich zu dem Grundgefüge an. Die erzielten Randzonenbeschaffenheiten haben tendenziell keine Anlasszonen, da der Stahl R260 aufgrund des geringen Legierungsgrades und einer fehlenden Wärmebehandlung eine relativ geringe Ausgangshärte von 260 - 300 HV hat. Die durch das Schienenschleifen erzielten Randzonen ähneln sich damit den von WILKE [WIL08] beschriebenen Phänomenen der Werkstoffhärtung durch das Schleifen, dem so genannten Schleifhärtungen. Zur Bewertung und Charakterisierung der Schienenrandzone ist es daher sinnvoll, die Kenngröße Härtungstiefe CHD HV 0,3 heranzuziehen, die auch WILKE [WIL08] zur Charakterisierung schleifgehärteter Randzonen empfiehlt. Die Härtungstiefe wird entsprechend der Norm [DIN EN 10328] aus der in regelmäßigen Abständen von der Schienenoberfläche gemessenen Mikrohärtigkeit abgeleitet.

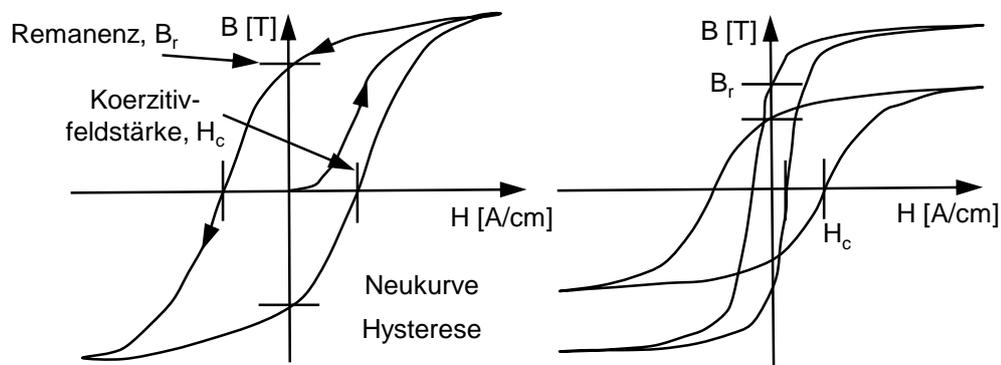
Physikalische Grundlagen des 3MAII-Verfahrens

Die mechanischen Eigenschaften eines metallischen Werkstoffes werden durch sein Mikrogefüge bestimmt. Hierbei spielen die chemische Zusammensetzung sowie thermische und mechanische Vorbehandlung eine Rolle. Die mechanischen Werkstoffeigenschaften, wie die Zugfestigkeit oder die Härte als auch der Widerstand gegen plastische Deformation, werden durch die Anzahl und den Typ von Gitterstörungen und ihrer Versetzungsbeweglichkeit be-

einflusst. Die ferromagnetischen Werkstoffe bestehen aus kleinen, abgeschlossenen Bereichen, magnetische Domänen, die eine homogene, unidirektionale Magnetisierung aufweisen. Im unmagnetisierten Zustand sind die Magnetisierungsrichtungen der Domänen so verteilt, dass die Gesamtmagnetisierung des Werkstoffes bzw. Werkstoffbereiches neutral ist. Nachdem jedoch der Werkstoff durch ein äußeres Magnetfeld magnetisiert wird, ändern sich die Magnetisierungsrichtungen in Richtung des äußeren Magnetfeldes. Hierbei wachsen zunächst die Domänen, deren Magnetisierungsrichtung möglichst parallel zum äußeren Magnetfeld orientiert ist, während die anders orientierten Domänen kleiner werden. Bei einer zyklischen Ummagnetisierung wird durch den Werkstoff die magnetische Hysteresekurve durchlaufen, die den nichtlinearen Zusammenhang zwischen magnetischer Flussdichte B im Werkstoff und Feldstärke H des äußeren Magnetfeldes beschreibt. In [Bild 5-1](#) sind die magnetischen Hysteresen eines magnetisch weichen und eines magnetisch harten Werkstoffes gezeigt. Die Reaktion des Werkstoffes auf die Magnetisierung kann durch folgende magnetische Kenngrößen beschrieben werden [FRA07]:

- Remanenz B_r ,
- magnetische Permeabilität f_{Jr} ,
- Koerzitivfeldstärke H_c .

Zwischen den mechanischen und magnetischen Eigenschaften in ferromagnetischen Werkstoffen sind konkrete Zusammenhänge bekannt, da die beiden Eigenschaftsklassen durch vergleichbare mikrostrukturelle Charakteristika beeinflusst werden [BOR97, THE82].



[Bild 5-1](#): Magnetische bei wechselnden ferromagnetischen Werkstoffeigenschaften [FRA07]

Das Akronym 3MAII bedeutet, dass mit dem System mikromagnetische Mikrostruktur- und Spannungs-Analysen unter Verwendung von diversen („multiplen“) Parametern durchgeführt werden können. Die 3MAII-Prüftechnik basiert auf einer gerätetechnischen und methodischen Kombination von vier mikromagnetischen Prüfverfahren [FRA07]:

- Oberwellenanalyse des Zeitsignals der magnetischen Tangentialfeldstärke (OA),
- Analyse des Barkhausen-Rauschen-Signals (BR),
- Analyse des Überlagerungspermeabilität-Signals (ÜP),
- Analyse des Mehrfrequenz-Wirbelstrom-Signals (WS).

Grundsätzlich kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich die Veränderungen der Mikrohärtigkeit, des Mikrogefüges sowie des Eigenspannungszustandes gleich auf die Magneti-

sierungskenngrößen auswirken. Die 3MAII-Messtechnik unterscheidet sich von den anderen ebenfalls auf der Mikromagnetisierung beruhenden Messverfahren, indem hier die Idee einer Kombination der Prüfgrößen umgesetzt wird. Zwischen den mechanischen Werkstoffkenngrößen und den magnetischen Eigenschaften sind aufgrund der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Werkstoffwissenschaft mehrere Zusammenhänge bekannt [VOL89, DIE86]. Bei der Beschreibung des Gefügestandes sind jedoch oft nur qualitative Aussagen möglich. Grundsätzlich ist zu sagen, dass für eine große Vielfalt von derzeit eingesetzten metallischen Werkstoffen mit unterschiedlichsten Zusammensetzungen und thermomechanischen Vorbehandlungsgraden besteht keine allgemeingültige Beschreibung der Zusammenhänge zwischen mikromagnetischen Prüfgrößen, dem Materialgefüge und den mechanischen Werkstoffeigenschaften. Aus diesem Grund ist eine Kalibrierung der 3MAII-Messtechnik an den Referenzproben für jeden zu messenden Werkstoff unerlässlich, um empirisch die Korrelationen zwischen den Prüfgrößen und den Zielgrößen zu ermitteln. Im Folgenden werden die in die 3MAII-Messtechnik integrierten vier Messverfahren kurz erläutert.

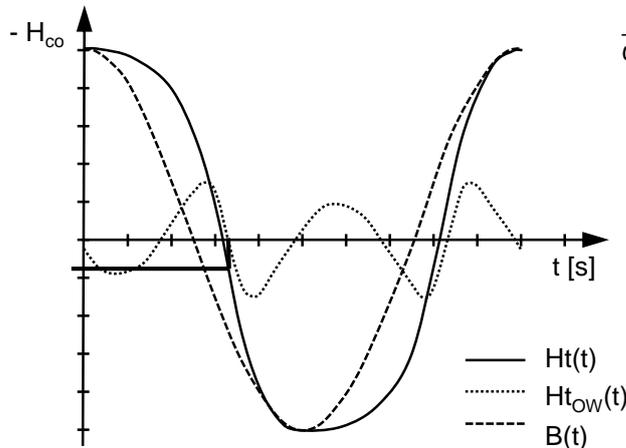
Oberwellenanalyse des Zeitsignals der magnetischen Tangentialfeldstärke (OA)

Bei einer Wechselfeldmagnetisierung werden neben der Grundfrequenz auch Oberwellenanteile angeregt, was bei einer sinusförmigen Erregerspannung zu einem nicht sinusförmigen zeitlichen Verlauf der Stromstärke des Magnetes führt, Bild 5-2 a). Zur Bestimmung der Amplituden und Phasen der Grundschwingung und der Oberwellen wird die Fourier-Analyse des Tangentialfeldes $H_t(t)$ bestimmt. Als Prüfgrößen fließen in das 3MAII-Verfahren die Amplituden und Phasen der 3-ten, 5-ten und 7-ten Oberwelle sowie die Amplitudensumme bis zur 9-ten Oberwelle mit ein. Gegenüber den anderen Verfahren der 3MAII-Prüftechnik erlaubt die Oberwellenanalyse die Untersuchung tieferer Werkstoffbereiche und ist auch bei flacheren Gefüge- und Spannungsgradienten einsetzbar, wie sie beispielsweise bei einsatzgehärteten Bauteilen auftreten. Für ein bestimmtes Erregersystem ist die Wechselwirkungstiefe h_{ww} abhängig von der Magnetfeldaussteuerung H_E und der Erregerfrequenz f_{3MAII} und kann bis zu $h_{ww} = 10$ mm betragen [FRA07].

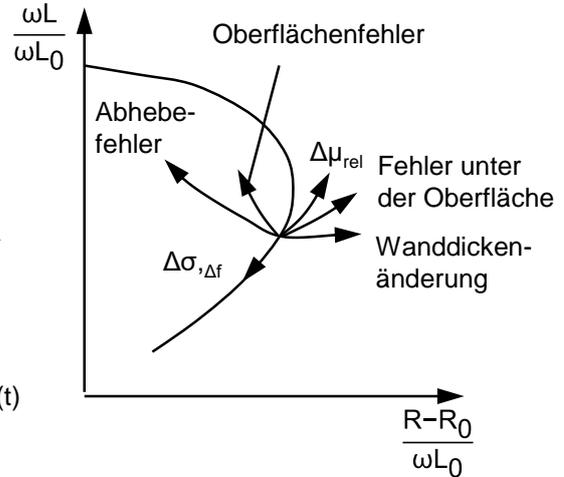
Barkhausen-Rauschen (BR)

Die Barkhausen-Ereignisse werden durch gepulste Wirbelströme im Frequenzbereich $f = 0 - 3$ MHz angeregt. Die Wirbelströme werden mithilfe eines magnetinduktiven Sensors an der Oberfläche als Rauschsignal (Barkhausen-Rauschen) aufgenommen und dessen Amplituden durch Dispersion frequenzabhängig gedämpft. Dies führt dazu, dass sich die Barkhausen-Rauschen-Signale mit zunehmender Entfernung zu tieferen Frequenzen hin entmischen. Das nachfolgend digitalisierte geglättete Barkhausen-Rauschen-Signal wird als Funktion der Magnetfeldstärke $M(H)$, auch Barkhausen-Rauschen-Profilkurve genannt, aufgezeichnet. Aus dieser können sieben Prüfgrößen abgeleitet werden, Bild 5-2 b). Die Korrelation dieser Prüfgrößen mit Werkstoffeigenschaften sind teilweise beschrieben [DOB98, DOB94].

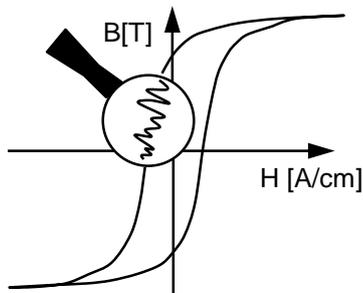
a) Oberwellenanalyse



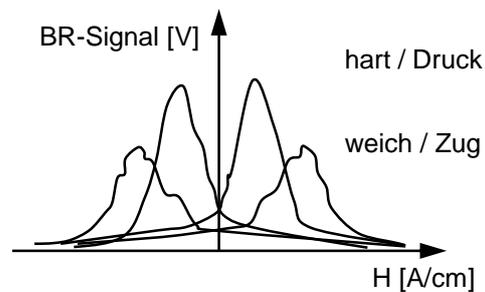
d) Mehrfrequenz-Wirbelstrom



b) Barkhausen-Rauschen

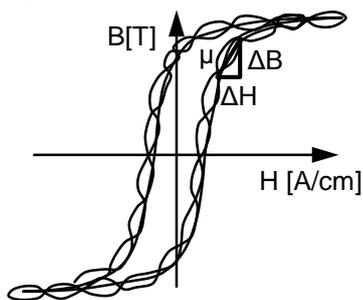


Hochaufgelöste Hysterese mit Barkhausen-Sprüngen



Barkhausen-Rauschen-Profilkurve $M(H)$ für einen harten und einen weichen Werkstoff

c) Überlagerungspermeabilität



Hysterese mit hochfrequenten Innenschleifen
 ÜP-Profilkurve $\mu(H)$ für einen harten und einen weichen Werkstoff

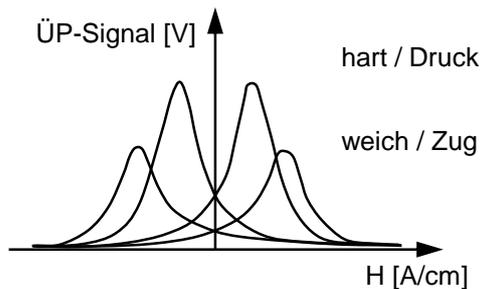


Bild 5-2: Magnetisierungsverfahren des 3MAIL-Systems [FRA07]

Überlagerungspermeabilität (ÜP)

Beim Prüfverfahren der Überlagerungspermeabilität erfolgt eine Berechnung des reversiblen Anteils der momentanen Magnetisierungsänderung. Hierbei wird der niederfrequenten dynamischen Magnetisierung mit der Erregerfrequenz f_{3MAIL} und der Magnetfeldaussteuerung H_E ein Wirbelstrom wesentlich höherer Frequenz und geringerer Aussteuerung überlagert. Das überlagerte Wechselfeld hat kleine Innenschleifen der Hysterese zur Folge, aus

deren Steigung sich die Überlagerungspermeabilität ergibt, Bild 5-2 c). Analog zu dem Barkhausen-Rauschen-Signal (BR) kann mit dem Überlagerungspermeabilität-Signal (ÜP) ebenfalls eine Charakterisierung gehärteter Randschichten vorgenommen werden. Die Härtetiefeninformation leitet sich wiederum aus der Amplitude des Messsignals μ_{\max} des Kerngefüges, die Randhärte aus der zum Randgefüge gehörigen Koerzitivfeldstärke H_c ab. Über die Wahl der Wirbelstrom-Erregerfrequenz f_D kann das Analysiervolumen verändert werden, wobei der Grundmechanismus für die Tiefenvariation wie beim Barkhausen-Rauschen durch die Wirbelstromdämpfung gegeben ist [FRA07].

Mehrfrequenz-Wirbelstrom (WS)

Die Wirbelstromprüfung basiert auf der Veränderung der Spulenimpedanz, verursacht durch die Wechselwirkung des erzeugten elektromagnetischen Feldes mit dem Prüfgegenstand, Bild 5-2 d). Durch die Anlegung einer hochfrequenten Wechselspannung an der Spule erfolgt eine Induktion eines elektromagnetischen Wechselfeldes. Das Wechselfeld induziert die Wirbelströme, die von der Frequenz der anliegenden Wechselspannung und der Leitfähigkeit und Permeabilität des Materials abhängig sind. Eine Veränderung von Gefüge oder Eigenspannungen im Bauteil führt zur Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität f_J , was die Stärke und Ausbreitung der Wirbelströme beeinflusst. Zur Vermeidung der Beeinflussung der Messgrößen durch die Störgrößen empfiehlt der Hersteller eine von insgesamt vier Wirbelstrom-Frequenzen f_{WS} einzusetzen.

Durch die 3MAII-Messtechnik können gleichzeitig bis zu 41 unterschiedlichen mikromagnetischen Prüfgrößen aufgenommen werden, Tabelle 5-1. Bis auf den Mehrfrequenz-Wirbelstrom basieren alle Verfahren der 3MAII-Prüftechnik auf der zyklischen Ummagnetisierung des Werkstoffs mithilfe eines starken Wechselfeldes, dessen Amplitude die Koerzitivfeldstärke H_c des Werkstoffs deutlich übersteigt.

Die 3MAII-Messungen können kontaktfrei, bei den Abhebungen des Messensors von der Bauteiloberfläche von bis zu 3 mm durchgeführt werden. Abhängig von der Prüfaufgabe können Erregerfrequenzen zwischen $f_{3MAII} = 10 - 1000$ Hz eingestellt werden. Die Amplitude des Tangentialfeldes ist geregelt, um eine reproduzierbare Anregung für Werkstoffe mit unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften oder bei Variation der Prüfkopfhebung zu gewährleisten. Je nach Prüfaufgabe und Werkstoff wird typischerweise eine Magnetfeldaussteuerung im Bereich $H_E = 10 - 200$ A/cm eingesetzt. Es können Informationen über den Bauteilzustand auf die Tiefe bis zu $z = 10$ mm geliefert werden. Laut Herstellerangaben können für die 3MAII-Messtechnik zwei wichtige Hauptanwendungsfelder genannt werden:

- Prüfung mechanisch bearbeiteter bzw. randschichtgehärteter Bauteiloberflächen (Schleifen, Hartdrehen, Fräsen, Honen, Strahlen),
- Prüfung von Flach- und Stabstahl-Produkten bei Urform-, Umform-, Wärmebehandlungs- und Veredelungsprozessen.

Tabelle 5-1: 3MAII-Kenngrößen [FRA07]

Kurzzeichen	Einheit	Benennung
$H_{c\mu}$	[A/cm]	Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus $\mu(H)$ -Kurve
H_{cM}	[A/cm]	Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der $M(H)$ -Kurve
H_{co}	[A/cm]	Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus dem Verfahren Oberwellenanalyse
H_{ro}	[A/cm]	Oberwellenanteil von H_i im Nulldurchgang
I_m	[V]	Imaginärteil des Wirbelstrom-Signals
K	[%]	Klirrfaktor
M_a	[V]	Betrag des Wirbelstrom-Signals
M_f	[V]	Messwert für $M(H)$ bei $H = 0$ A/cm
M_{max}	[V]	Maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens
M_{mean}	[V]	Zeitlicher Mittelwert der $M(H)$ -Kurve über eine Periode
Ph	[rad]	Phase des Wirbelstrom-Signals
Re	[V]	Realteil des Wirbelstrom-Signals
UHS	[A/cm]	Amplitudensumme
V_{mag}	[V]	Amplitude der Endstufenspannung
$\Delta H_{25\mu}$ $\Delta H_{50\mu}$ $\Delta H_{75\mu}$	[A/cm]	Aufweitung der $\mu(H)$ -Kurve bei $\mu = 0,25 * \mu_{max}$, $0,50 * \mu_{max}$ und $0,75 * \mu_{max}$
ΔH_{25M} ΔH_{50M} ΔH_{75M}	[A/cm]	Aufweitung der $M(H)$ -Kurve bei $M = 0,25 * M_{max}$, $0,50 * M_{max}$ und $0,75 * M_{max}$
μ_{max}	[V]	Maximum der $\mu(H)$ -Kurve innerhalb einer Periode
μ_{mean}	[V]	Zeitlicher Mittelwert der $\mu(H)$ -Kurve über eine Periode
μ_r	[V]	Messwert für $\mu(H)$ bei $H = 0$ A/cm

Identifikation und Überprüfung geeigneter 3MAII-Kenngrößen zur Analyse von Schienenrandzonen

Nach derzeitigem Stand der Technik kann das Messsystem 3MAII für einzelne Industrieanwendungen, wie endbearbeitete Lagerringe und Zahnräder, erfolgreich eingesetzt werden. Aufgrund der Tatsache, dass mit diesem System der gesamte Randzonenzustand eines Bauteils bestehend aus der Gefügestruktur und Härtungstiefe aufgenommen wird, ist die 3MAII-Messtechnik theoretisch für die zerstörungsfreie Analyse des Schienenzustandes gut geeignet. Wie im vorherigen Kapitel dargelegt, sind für unterschiedliche metallische Werkstoffe in Bezug auf die Randzonenbeschaffenheit und -parameter oft verschiedene 3MAII-Kenngrößen aussagekräftig. Für den Schienenstahl R260 sollen daher eine Reihe von experimentellen Kalibrierungsmaßnahmen zur Identifikation von konkreten geeigneten 3MAII-Kenngrößen, die direkte Korrelationen zu den Randzonenparametern ermöglichen, durchgeführt werden. Im Rahmen des Kapitels werden die 3MAII-Kenngrößen hinsichtlich ihrer Korrelation mit dem Randzonenparameter Härtungstiefe CHD HV 0,3 untersucht. Die Werte der Härtungstiefe CHD HV 0,3 werden aufbauend auf Messungen von Härte-Tiefe-Verläufen in den Randzonen anhand der Industrienorm [DIN EN ISO 2639] berechnet. Das zur Identifika-

tion und Überprüfung geeigneter 3MAII-Kenngrößen vorgenommene Vorgehen setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

- Theoretische Bewertung sämtlicher 41 3MAII-Kenngrößen hinsichtlich der Aussagekraft über die Härtungstiefe CHD HV 0,3,
- experimentelle Analyse und Bewertung ausgewählter 3MAII-Kenngrößen durch Messungen an mehreren im Vorfeld definierten Zuständen der Schienenrandzonen,
- Verifikation der 3MAII-Kenngrößen durch die Messungen der Mikrohärtigkeit an zerstörten Schienen und Auswahl der 3MAII-Kenngrößen, dessen Werte Korrelationen mit den gemessenen Härtungstiefe-Werten aufweisen,
- Feststellung der Reproduzierbarkeit und Messsicherheit von als geeignet identifizierten 3MAII-Kenngrößen und endgültige Auswahl der 3MAII-Kenngrößen, die beim Schienenschleifen zur zerstörungsfreien Qualifizierung der Schienenrandzonen eingesetzt werden sollen.

Dadurch, dass die 3MAII-Verfahren auf der Ummagnetisierung und den unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften bei verschiedenen Randzonenbeschaffenheiten basieren, sind bei der Verwendung der 3MAII-Messtechnik zusätzliche Einflüsse von unterschiedlich starken Abständen zwischen Prüfspule und Bauteiloberfläche (Abhebeeffect) und Variationen der Bauteil, Prüfgerät-Temperatur oder der Restmagnetisierung möglich. Zur Minimierung des Einflusses dieser Randbedingungen wird bei den Messungen daher stets auf konstante Randbedingungen geachtet.

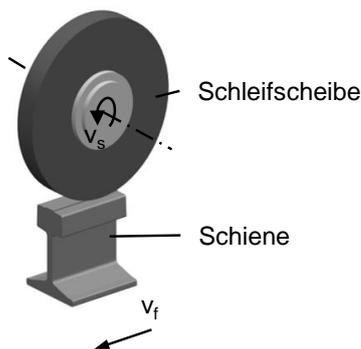
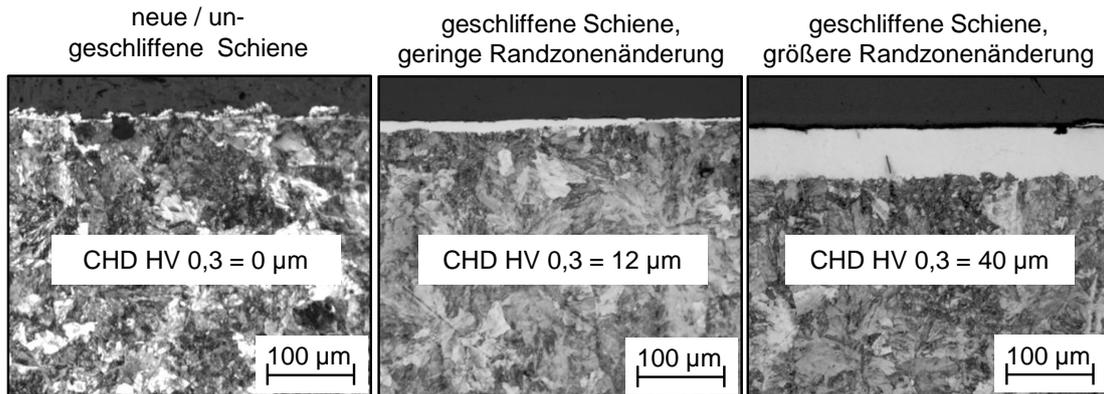
Zunächst wurde die Eignung der vier 3MAII-Verfahren Oberwellenanalyse des Zeitsignals der magnetischen Tangentialfeldstärke (OA), Barkhausen-Rauschen-Signal (BR), Überlagerungspermeabilität-Signal (ÜP) und Mehrfrequenz-Wirbelstrom-Signal (WS) zur zerstörungsfreien Bewertung des Randzonenzustandes von Schienen theoretisch bewertet. Anhand einer Literaturrecherche und basierend auf den Angaben des Messgeräteherstellers wurden für das jeweilige 3MAII-Verfahren je zwei 3MAII-Kenngrößen definiert, die einen direkten bzw. indirekten Zusammenhang mit dem Wert der Härtungstiefe CHD HV 0,3 haben können und daher experimentell untersucht werden sollten. Somit wurden insgesamt acht 3MAII-Kenngrößen analysiert, die in Tabelle 5-2 aufgezählt sind.

Tabelle 5-2: Ergebnis der theoretischen Vorauswahl der 3MAII-Kenngrößen

3MAII-Verfahren	3MAII-Kenngröße
Oberwellenanalyse des Zeitsignals der magnetischen Tangentialfeldstärke (OA)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Klirrfaktor K ▪ Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co}
Barkhausen-Rauschen (BR)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} ▪ Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der M(H)-Kurve H_{cm}
Überlagerungspermeabilität (ÜP)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ maximale Amplitude der Überlagerungspermeabilität μ_{max} ▪ Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität H_{cp}
Mehrfrequenz-Wirbelstrom (WS)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Realanteil des Wirbelstrom-Signals Re ▪ Imaginärteil des Wirbelstrom-Signals Im

Zur experimentellen Analyse und Bewertung der Eignung der ausgewählten 3MAII-Kenngrößen wurden insgesamt drei Randzonenzustände definiert, Bild 5-3, die sich in Bezug auf ihre Härtungstiefe CHD HV 0,3 deutlich unterscheiden:

- neuwertige Schiene mit homogener Struktur der Randzone und der Härtungstiefe CHD HV 0,3 $\approx 0 \mu\text{m}$,
- geschliffene Schiene mit einem geringen Veränderungsgrad der Randzone und der Härtungstiefe CHD HV 0,3 $\approx 12 \mu\text{m}$,
- geschliffene Schiene mit einem starken Veränderungsgrad der Randzone und der Härtungstiefe CHD HV 0,3 $\approx 40 \mu\text{m}$.



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

$v_s = 35 \text{ m/s}$

$a_e = 0,03 \text{ mm}$

v_f variabel

$a_p = 20 \text{ mm}$

Gegenlauf

Trockenbearbeitung

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

zylindrische Schleifscheibe

STELLA KERAMIK

$300 \times 30 \times 127 \text{ mm}^3$

Korngröße 20 Mesh

Kunstharzbindung

100 % Schmelzkorund

Härte Q (hochhart)

Struktur 4

Werkstück / Schiene

gerade Vignolschiene S49

VOESTALPINE AG

Stahl R260

$l = 140 \text{ mm}$

Bild 5-3: Randzonenzustände der Schienen zur Auswahl geeigneter 3MAII-Kenngrößen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse separat für die vier untersuchten 3MAII-Verfahren dargestellt. Hierbei erfolgt zunächst die Beschreibung der jeweiligen Kenngrößen bzw. die Vorstellung von Vorgehensweisen zu deren Ableitung. Anschließend sind Diagramme aufgeführt, die eine randzonenabhängige Veränderung der 3MAII-Kenngrößen im untersuchten Erregerfrequenzbereich $f_{3MAII} = 50 - 500 \text{ Hz}$ zeigen.

Oberwellenanalyse des Zeitsignals der magnetischen Tangentialfeldstärke (OA)

Die OA-Kenngröße Klirrfaktor K wird bestimmt, indem das prozentuale Verhältnis der Leistung der höheren harmonischen Schwingung P_{hs} zur Leistung der Grundschwingung P_{GS} ermittelt wird. Bei randschichtgehärteten Bauteilen ändern sich die entstehenden Oberwellenanteile abhängig vom Verhältnis des Kernwerkstoffes zum Randschichtwerkstoff. Mit zunehmender Härtungstiefe tritt eine deutliche Verringerung der Oberwellenamplitude auf und auch der Klirrfaktor K wird reduziert. Die weitere OA-Kenngröße Koerzitivfeldstärke, abgelei-

tet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , wird bestimmt, indem eine inverse Fourier-Transformation des Zeitsignals $H_t^{OW}(t)$ vorgenommen wird. Grundsätzlich steigen die H_{co} -Werte mit der Steigerung der Oberflächen- bzw. Randzonenhärte an [FRA07]. Die Ergebnisse der zerstörungsfreien Analyse der Schienenrandzonen unter Verwendung der Kenngrößen des 3MAII-Verfahrens Oberwellenanalyse des Zeitsignals der magnetischen Tangentialfeldstärke (OA) sind in Bild 5-4 dargestellt. Der Klirrfaktor K sinkt mit der Steigerung der Härtungstiefe CHD HV 0,3 der Schienenrandzone eindeutig. Es bestätigt sich, dass mithilfe dieser 3MAII-Kenngröße unterschiedliche Randzonenbeschaffenheiten detektiert werden können. Jedoch gilt diese Aussage für den Bereich der Erregerfrequenzen $150 \text{ Hz} \leq f_{3MAII} \leq 500 \text{ Hz}$, während bei der Erregerfrequenz $f_{3MAII} \leq 150 \text{ Hz}$ die Messergebnisse kaum Aussagekraft haben. Unter Verwendung der Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , können unabhängig von der Erregerfrequenz im Bereich $150 \text{ Hz} \leq f_{3MAII} \leq 500 \text{ Hz}$ unterschiedliche Beschaffenheiten der Randzonen klar qualifiziert werden. Zwar konnten keine quantitativen Zusammenhänge zwischen den H_{co} -Werten mit den tatsächlichen CHD HV 0,3-Werten beschrieben werden, für eine qualitative bzw. vergleichende Analyse der Schienenrandzonen scheint diese 3MAII-Kenngröße jedoch gut geeignet zu sein. Grundsätzlich können somit sowohl der Klirrfaktor K (unter Berücksichtigung des begrenzten Bereiches der Erregerfrequenzen f_{3MAII}), als auch die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} als geeignete 3MAII-Kenngrößen für vergleichende Messungen an Schienenrandzonen herangezogen werden. Aufgrund einer höheren Aussagekraft wird für die in der Arbeit verfolgte Schienenspezifikationen die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , verwendet.

Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

$v_s = 35 \text{ m/s}$

$a_e = 0,03 \text{ mm}$

v_f variabel

$a_p = 20 \text{ mm}$

Gegenlauf

Trockenbearbeitung

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

zylindrische Schleifscheibe

STELLA KERAMIK

$300 \times 30 \times 127 \text{ mm}^3$

Korngröße 20 Mesh

Kunstharzbindung

100 % Schmelzkorund

Härte Q (hochhart)

Struktur 4

Werkstück / Schiene

gerade Vignolschiene S49

VOESTALPINE AG

Stahl R260

$l = 140 \text{ mm}$

Randzonenzustand

◇ neue / ungeschliffene Schiene

◆ geschliffene Schiene, geringe Randzonenänderung ($v_f = 15 \text{ m/min}$)

◇ geschliffene Schiene, größere Randzonenänderung ($v_f = 10 \text{ m/min}$)

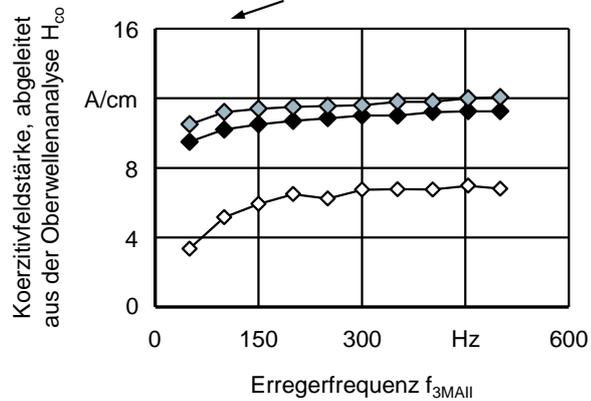
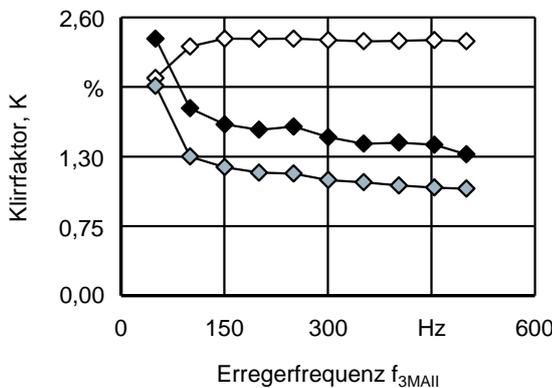
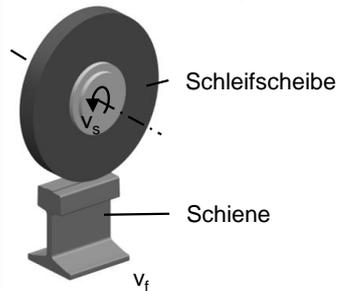


Bild 5-4: Eignung der OA-Kenngrößen Klirrfaktor K und Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} zur Qualifizierung unterschiedlicher Randzonenzustände

Barkhausen-Rauschen (BR)

Die BR-Kenngröße maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} wird aus der $M(H)$ -Kurve abgeleitet. Besonders rauschaktiv sind bei den technischen Stählen ($H_c > 5 \text{ Ncm}$) die Hystereseabschnitte in der Umgebung der Koerzitivfeldstärke H_c . Tendenziell treten bei der Steigerung der Erregerfrequenz $f_{3\text{MAII}}$ immer größere Differenzen zwischen den unterschiedlichen Randzonenzuständen entsprechenden M_{\max} -Messwerten auf. Die weitere BR-Kenngröße, Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der $M(H)$ -Kurve, H_{cm} , wird aus der Magnetfeldstärke bei der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens ausgerechnet [FRA07]. Die Eignung der genannten zwei BR-Kenngrößen zur zerstörungsfreien Analyse der Schienenrandzonen kann Bild 5-5 entnommen werden. Es zeigt sich deutlich, dass unter Verwendung der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} unterschiedliche durch das Schleifen erzeugte Randzonenzustände erkannt und qualitativ miteinander bzw. mit dem Ausgangszustand der Schiene vor dem Schleifen verglichen werden können. Die Ableitung der genauen Werten der Härtungstiefe CHD HV 0,3 bzw. die quantitative Rekonstruktion von Härte-Tiefe-Verläufen in den Randzonen scheint jedoch erschwert zu sein, da die Messwerte zusätzlich durch eine starke Veränderung des Gefüges bzw. des Zähigkeitszustandes beeinflusst zu sein scheinen. Bei den Messungen an geschliffenen und nicht geschliffenen Randzonen, nehmen die H_{cm} -Werte mit einer Steigerung des Grades der plastischen Materialverformung zu. Werden einzig die an geschliffenen Randzonen gemessenen H_{cm} -Werte betrachtet, wird deutlich, dass diese umgekehrt proportional mit der Härtungstiefe CHD HV 0,3 korrelieren. Schlussfolgend ist zu verzeichnen, dass die eindeutigen Tendenzen zwischen der maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} mit der Härtungstiefe CHD HV 0,3 vorliegen, während die 3MAII-Kenngröße Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der $M(H)$ -Kurve, H_{cm} , eine geringere Aussagekraft darbietet.

Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

$v_s = 35$ m/s

$a_e = 0,03$ mm

v_f variabel

$a_p = 20$ mm

Gegenlauf

Trockenbearbeitung

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

zylindrische Schleifscheibe

STELLA KERAMIK

300 x 30 x 127 mm³

Korngröße 20 Mesh

Kunstharzbindung

100 % Schmelzkorund

Härte Q (hochhart)

Struktur 4

Werkstück / Schiene

gerade Vignolschiene S49

VOESTALPINE AG

Stahl R260

$l = 140$ mm

Randzonenzustand

◇ neue / ungeschliffene Schiene

◆ geschliffene Schiene, geringe Randzonenänderung ($v_f = 15$ m/min)

◇ geschliffene Schiene, größere Randzonenänderung ($v_f = 10$ m/min)

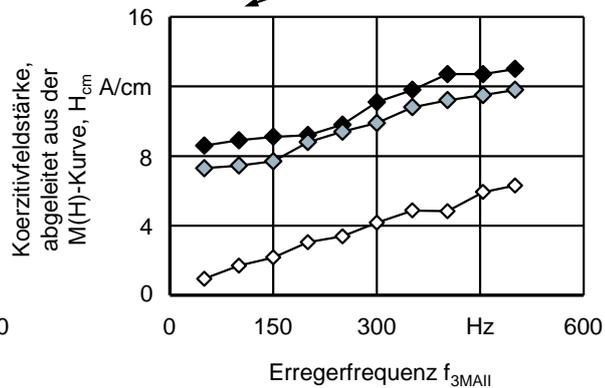
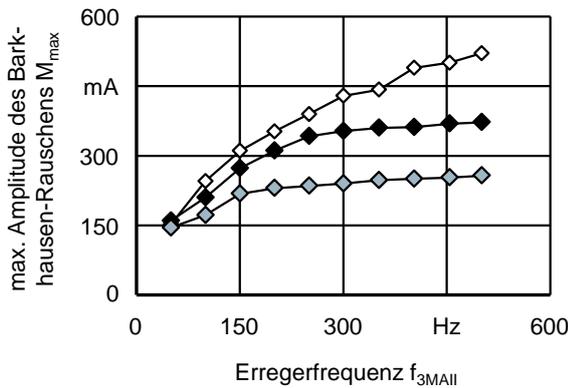
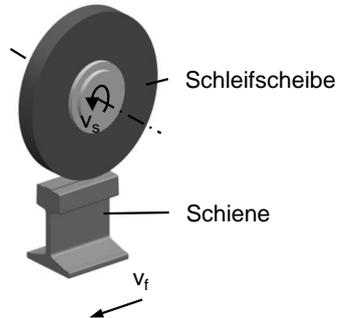


Bild 5-5: Eignung der BR-Kenngrößen maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} und Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der M(H)-Kurve, H_{cm} zur Qualifizierung unterschiedlicher Randzonenzustände

Überlagerungspermeabilität (ÜP)

Bild 5-6 zeigt, inwieweit die ausgewählten ÜP-Kenngrößen im ausgewählten Frequenzbereich mit den unterschiedlichen Randzonenbeschaffenheiten korrelieren. Die maximale Amplitude der Überlagerungspermeabilität μ_{max} ist dabei kaum von der Härtungstiefe CHD HV 0,3 der Randzone abhängig, da die höchsten μ_{max} -Werte bei der größten Randzonenschädigung, die geringsten μ_{max} -Werte jedoch nicht bei geringster Randzonenveränderung festgestellt werden. Diese Aussage kann ebenfalls in Bezug auf die ÜP-Kenngröße Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität, H_{cu} , getroffen werden. Dabei kommt es zusätzlich zu unregelmäßigen Schwankungen der Messwerte in Abhängigkeit der Erregerfrequenz f_{3MAII} um bis zum Faktor 4. Es kann vermutet werden, dass für den untersuchten Werkstoff Stahl R260 die magnetischen Permeabilität-Parameter durch die Härtungstiefe CHD HV 0,3 eher in einem vergleichbar geringen Maß beeinflusst werden. Für die untersuchte Kombination der Werkstoffspezifikation und Messrandbedingungen scheinen beide analysierten Kenngrößen begrenzt geeignet zu sein und werden daher zunächst nicht weiter verfolgt.

Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

$v_s = 35$ m/s

$a_e = 0,03$ mm

v_f variabel

$a_p = 20$ mm

Gegenlauf

Trockenbearbeitung

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

zylindrische Schleifscheibe

STELLA KERAMIK

$300 \times 30 \times 127$ mm³

Korngröße 20 Mesh

Kunstharzbindung

100 % Schmelzkorund

Härte Q (hochhart)

Struktur 4

Werkstück / Schiene

gerade Vignolschiene S49

VOESTALPINE AG

Stahl R260

$l = 140$ mm

Randzonenzustand

◇ neue / ungeschliffene Schiene

◆ geschliffene Schiene, geringe Randzonenänderung ($v_f = 15$ m/min)

◇ geschliffene Schiene, größere Randzonenänderung ($v_f = 10$ m/min)

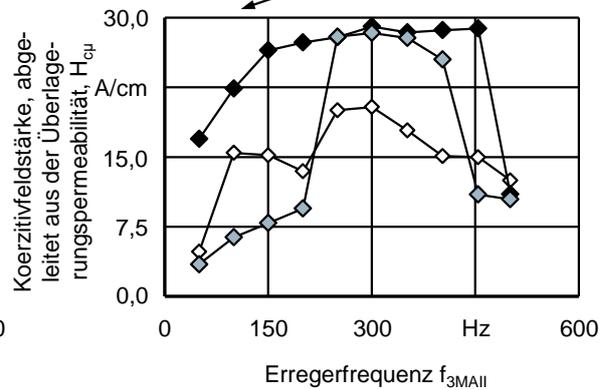
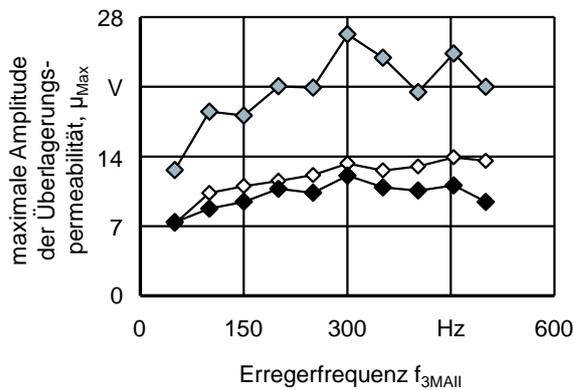
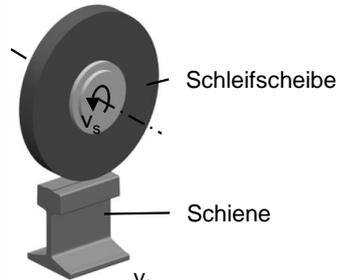


Bild 5-6: Eignung der ÜP-Kenngrößen maximale Amplitude der Überlagerungspermeabilität μ_{max} und Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität, $H_{c\mu}$ zur Qualifizierung unterschiedlicher Randzonenzustände

Mehrfrequenz-Wirbelstrom (WS)

Aus dem gesamten Impedanz-Signal lassen sich zur besseren Auswertung die Real- Re und Imaginärteile Im ablesen. Die Ergebnisse der zerstörungsfreien Analyse der Schienenrandzonen unter Verwendung dieser Kenngrößen des 3MAII-Verfahrens Mehrfrequenz-Wirbelstrom (WS) sind in Bild 5-7 gezeigt. Hierbei gelten sowohl für den Realteil, als auch für den Imaginärteil des Wirbelstrom-Signals gleiche Aussagen: Ein klarer Zusammenhang zur Härtungstiefe CHD HV 0,3 der Randzone kann kaum hergestellt werden. Mit der Steigerung der Erregerfrequenz f_{3MAII} kommt es zu unregelmäßigen Steigerungen bzw. Senkungen der Re - und Im -Messwerte. Aus diesem Grund scheinen die WS-Kenngrößen für den betrachtenden Anwendungsfall ungeeignet zu sein.

Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

$v_s = 35$ m/s

$a_e = 0,03$ mm

v_f variabel

$a_p = 20$ mm

Gegenlauf

Trockenbearbeitung

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

zylindrische Schleifscheibe

STELLA KERAMIK

300 x 30 x 127 mm³

Korngröße 20 Mesh

Kunstharzbindung

100 % Schmelzkorund

Härte Q (hochhart)

Struktur 4

Werkstück / Schiene

gerade Vignolschiene S49

VOESTALPINE AG

Stahl R260

$l = 140$ mm

Randzonenzustand

◇ neue / ungeschliffene Schiene

◆ geschliffene Schiene, geringe Randzonenänderung ($v_f = 15$ m/min)

◇ geschliffene Schiene, größere Randzonenänderung ($v_f = 10$ m/min)

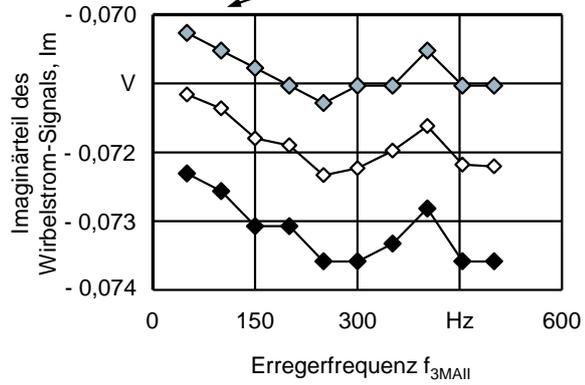
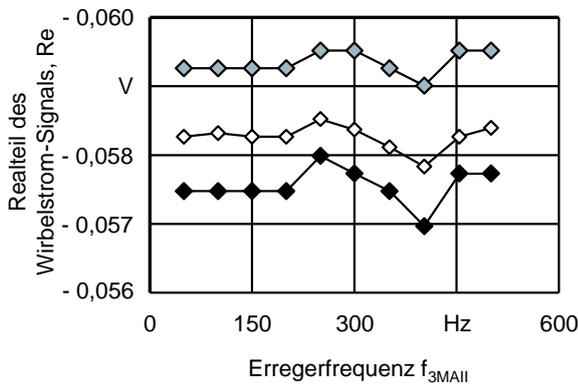
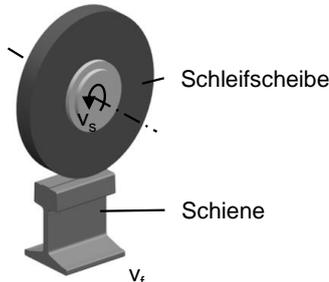


Bild 5-7: Eignung der WS-Kenngrößen Real- Re und Imaginärteil Im des Wirbelstromsignals zur Qualifizierung unterschiedlicher Randzonenzustände

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die 3MAII-Kenngrößen Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} und maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} eindeutige qualitative Korrelationen mit der Härtungstiefe CHD HV 0,3 der Schienenrandzonen aufweisen. Während der H_{co} -Wert mit der Erhöhung des Veränderungsgrades der Randzonen steigt, konnte bei den M_{max} -Werten eine umgekehrt proportionale Korrelation identifiziert werden.

Anschließend wird die Reproduzierbarkeit von Messungen unter Verwendung der zwei als gut zur Randzonenqualifizierung geeignet eingestuft 3MAII-Kenngrößen Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} und maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} untersucht. Dazu wurden an fünf Stellen einer Schiene je zehn gleiche Messungen jeweils durch drei unterschiedliche Bediener und an drei unterschiedlichen Orten durchgeführt und deren Ergebnisse miteinander verglichen. Der für diese Messungen eingesetzte Bereich der Erregerfrequenzen beträgt $f_{3MAII} = 50 - 500$ Hz. Das Ergebnis ist, dass beide Kenngrößen eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit ($> 85\%$) haben und zur qualitativen Bewertung der Schienenrandzonen herangezogen werden können, Bild 5-8.

Die Tatsache der umgekehrt proportionalen Korrelation zwischen der Veränderung des Härtungszustandes der Schiene mit der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} kann zusätzlich unter Verwendung der Forschungsquellen aus dem Gebiet der mikromagnetischen Messungen der metallischen Bauteile bestätigt werden. GORGELS [GOR11] untersuchte beispielsweise den Zusammenhang der Barkhausen-Rauschen-Kenngrößen mit in

unterschiedlichem Maße thermisch veränderten Randzonen des Stahls 16MnCr5. Er stellte dabei fest, dass beim Härteabfall ein kontinuierlicher Anstieg der Barkhausen-Rauschen-Werte erfolgt und bei dem Übergang zu dem Neuhärtungsbereich diese kontinuierlich abnehmen. Die BR-Werte können dabei deutlich unterhalb des Referenzzustandes gehen (entspricht dem nicht geschädigten Materialzustand). Es ist ersichtlich, dass im Fall des Schienenschleifens aufgrund der sehr hohen thermischen Werkstoffbelastung in Kombination mit einer relativ geringen Basishärte des Werkstoffes der Sättigungsbereich stets erreicht wird, so dass mit steigendem Maß der thermischen Randzonenveränderung die korrespondierenden Barkhausen-Rauschen-Werte, im vorliegenden Fall ist das die maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} , sinken.

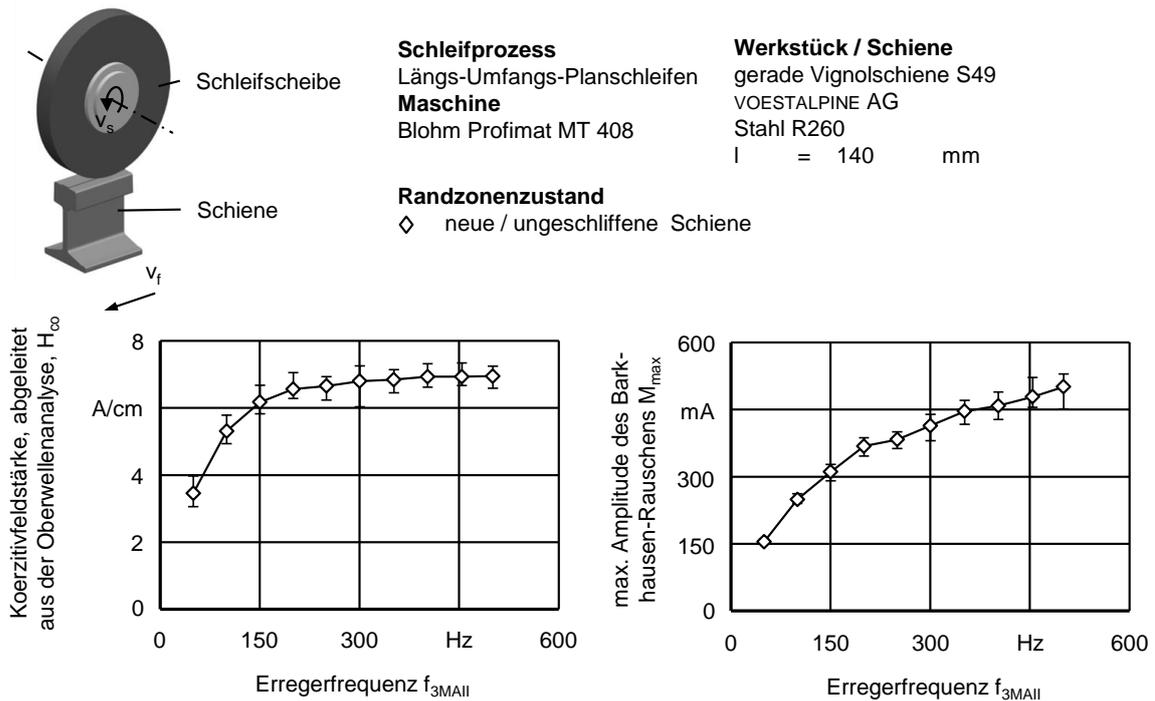


Bild 5-8: Reproduzierbarkeit der Messungen mit den ausgewählten 3MAII-Kenngrößen

Entwicklung und Verifikation des deskriptiven Modells zur Bestimmung des Schädigungszustandes von geschliffenen Schienen auf Basis der 3MAII-Messwerte

Durch ein deskriptives Modell des Schädigungszustandes der geschliffenen Schienen auf Basis der 3MAII-Messwerte soll eine bessere Abschätzung und Vorhersage des Randzonenzustandes der Schienen nach einem Schleifvorgang ermöglicht werden, ohne dabei eine zeit- und kostenintensive Zerstörung der Schienen durchzuführen. Das Modell dient dem Ableiten der Härtungstiefe der Randzone CHD HV 0,3 in Abhängigkeit der in den zerstörungsfreien Modi, beispielsweise an einem Schienenabschnitt, gemessenen Werten der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} und der Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} . Die Modellentwicklung erfolgt basierend auf dem im Kapitel 4.2 beschriebenen Ansatz der multiplen linearen Regressionsanalyse (MLR). Insgesamt werden zwei Modelle separat für die beiden als geeignet identifizierten 3MAII-Kenngrößen, maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} und die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , erarbeitet. Diese stellen gleichzeitig die Eingangsgrößen der Modelle dar. Die Zielgrößen der Modelle sind die damit korrespondierenden Werte der

Härtungstiefe CHD HV 0,3. Das Ergebnis der Modellentwicklung für die jeweiligen 3MAII-Kenngrößen ist in Tabelle 5-3 in Form der Regressionskoeffizienten dargestellt.

Tabelle 5-3: Koeffizienten für das deskriptive Regressionsmodell zur Bestimmung des Schädigungszustandes von geschliffenen Schienen auf Basis von 3MAII-Messwerte

M _{max}		H _{co}	
Koeffizient β _i	CHV HV 0,3	Koeffizient β _i	CHV HV 0,3
β ₁	-329,61	β ₁	3,357
β ₂	219,34	β ₂	0,1602
β ₀	126,49	β ₀	-28,17
R ²	96,5	R ²	92,8

In Bild 5-9 sind das Regressionsmodell samt der zur Entwicklung des Modells herangezogenen empirischen Werte gezeigt. Anhand einer abschließenden Bewertung der Modelle durch die Analyse von Reynolds-Werten (R = 96,7 % bzw. R = 93,5 %) ist die Aussagekraft des Modells als sehr gut einzustufen. Die Verifikation des hiermit entwickelten Modells erfolgt durch die Gegenüberstellung der modellierten Daten mit Ergebnissen der weiteren Messungen anderer Schienenrandzonen, wofür insgesamt fünf empirische Datenpunkte genutzt werden.

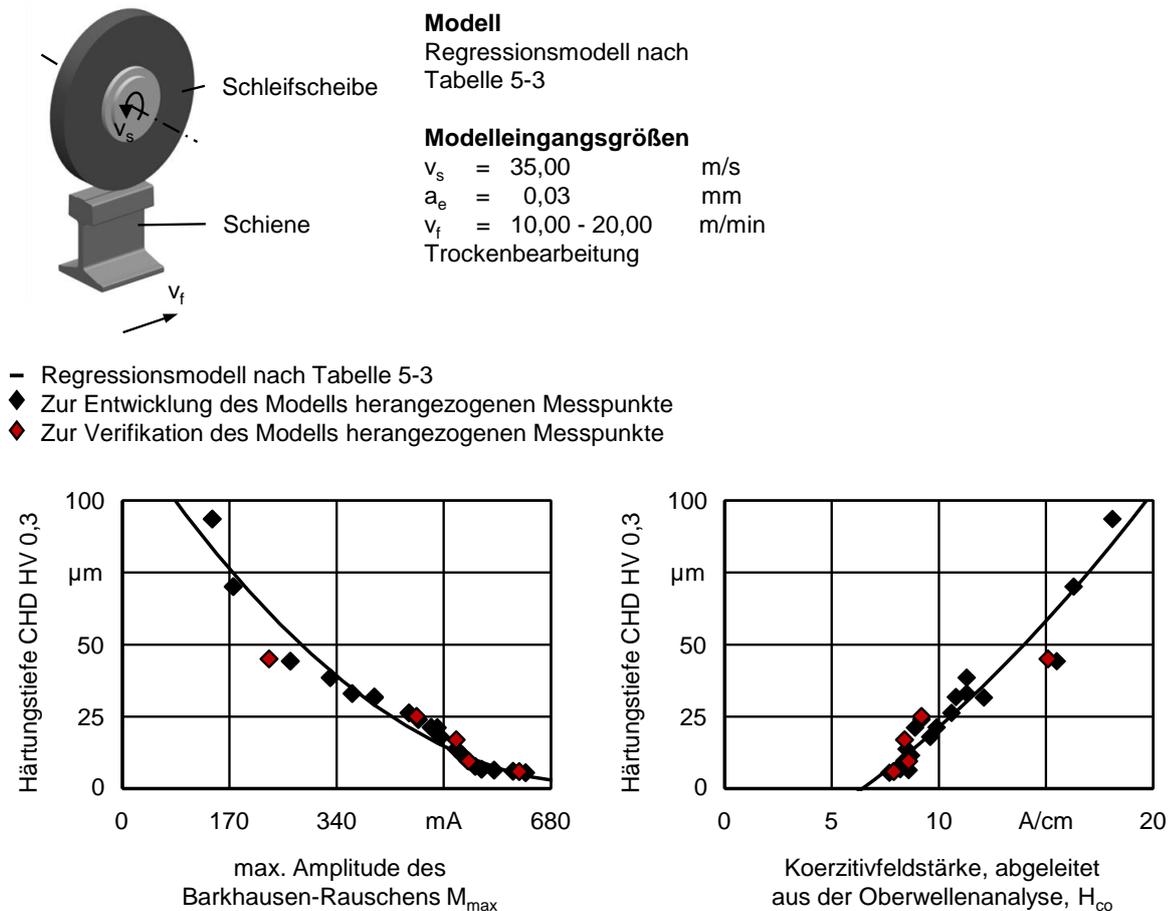


Bild 5-9: Verifikation des deskriptiven Regressionsmodells zur Bestimmung des Schädigungszustandes von geschliffenen Schienen auf Basis von 3MAII-Messwerte

6 Einfluss der Schientemperatur bei variierenden Prozessstellgrößen auf die Spanbildungsmechanismen beim Schienenschleifen

Die Schienenstähle weisen aufgrund des anzustrebenden hohen Ermüdungswiderstandes und der Bruchzähigkeit eine Sonderstellung unter den metallischen Werkstoffen auf. In der Literatur finden sich kaum Erkenntnisse über die Zerspanbarkeit sowie die Kältebeständigkeit von den Schienenstählen. HILLE [HIL14] gibt einen Überblick über die temperaturabhängigen Kerbschlagzähigkeiten für mehrere legierte ferritisch-perlitische Stähle mit dem Kohlenstoffgehalt $0,01 \% < C < 0,80 \%$ und weist auf die teilweise sprunghaften Steigerungen der Kerbschlagzähigkeit A_k bei den untersuchten Stahlwerkstoffen im Temperaturbereich $-200\text{ °C} < T < 300\text{ °C}$ hin, Bild 6-1. Erklärt wird dieses Phänomen durch eine geringere Beweglichkeit von Atomen infolge der Steigerung von interatomaren Anziehungskräften bei abfallenden Materialtemperaturen, die eine leichtere Umformbarkeit und Verschiebbarkeit von Kristallen und infolge dessen eine geringere Festigkeit verursachen. Auch der interlamellare Abstand ist für die mechanischen Eigenschaften derartiger Werkstoffe von Bedeutung. Eine klare Korrelation zwischen diesem Parameter mit der Härte nach Vickers liegt vor. Es kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund des feinperlitisches Gefüges, kombiniert mit dem Kohlenstoffgehalt $0,62 \% < C < 0,80 \%$, auch die Schienenstähle eine stark wechselnde temperaturabhängige Kerbschlagzähigkeit A_k aufweisen. Diese Annahme wird durch die Tatsache verstärkt, dass die mechanische Bearbeitung von Schienenstählen bei Umgebungstemperaturen $T < 0\text{ °C}$ durch viele Verkehrsunternehmen vermieden wird.

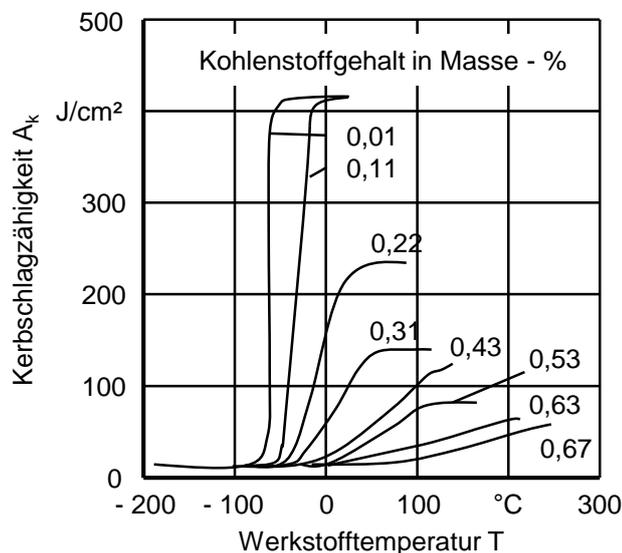


Bild 6-1: Temperaturabhängige Kerbschlagzähigkeiten A_k von unlegierten und niedrig legierten Stahlwerkstoffen [HIL14]

Durch das zu erwartende temperaturabhängige elastische Dehnverhalten des Schienenstahls R260 würde eine Veränderung der Werkstofftemperatur in dem für das Schienenschleifen als relevant definierten Temperaturbereich $-60\text{ °C} < T_s < 80\text{ °C}$ zu einer Veränderung der mechanischen Materialkennwerte wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Bruchstau-

chung führen. Bei einer Schleifbearbeitung von Schienen mit variierenden Temperaturen sind daher unterschiedliche Spanbildungsmechanismen, von dem so genannten „Sprödbrech“ bis hin zu einem duktilen Mikropflügen, durch eine Veränderung der Fließeigenschaften des Werkstoffes zu erwarten. Dies hat variierende Prozesskennwerte wie Normalkraft F_n , Tangentialkraft F_t , kontakflächenbezogene Schleifenergie E''_c und spezifische Schleifenergie e_c zur Folge, wodurch wiederum unterschiedliche Bearbeitungsergebnisse, charakterisiert durch die Oberflächen- und Randzonenkenngrößen arithmetischer Mittelwert der Profiordinaten R_a , mittlere größte Höhe des Profils R_z und Materialanteil R_{mr} (5 %; - 0,40 μm), Tiefe thermisch veränderter Randzone z , Härtungstiefe $\text{CHD HV } 0,3$ und die Eigenspannungen σ zu erwarten sind.

Zur Realisierung einer an die jeweiligen Anwendungsfälle angepassten Schienenschleifbearbeitung ist die Untersuchung der grundlegenden Spanbildungsmechanismen in Abhängigkeit der kinematischen sowie geometrischen Parameter eines Schleifprozesses sowie der Bauteiltemperatur notwendig. Das Ziel des vorliegenden Kapitels ist daher, den Einfluss der Schienentemperatur T_s sowie von Prozessstellgrößen, wie der Umfangsgeschwindigkeit v_s und der Zustellung a_e , auf die Spanbildungsmechanismen zu analysieren, damit diese letztlich als Stellgrößen für Prozessoptimierungen in Abhängigkeit der Umweltbedingungen eingestellt werden können. Anhand dieser Erkenntnisbasis sollen Schienenschleifprozesse mit einer gesteigerten Effektivität der Zerspanung ausgelegt und deskriptive Modelle zur Vorhersage der Spanbildung bei variierenden Werkstücktemperaturen und Stellgrößen erarbeitet werden.

Zum Gewinn von Erkenntnissen über den Einfluss von Prozessstellgrößen bei variierenden Schienentemperaturen auf die Spanbildungsmechanismen werden Einkornritzversuche nach der Kinematik des Tauchritzens durchgeführt. Hierbei erfolgt eine Nachbildung der grundlegenden Interaktionen zwischen dem Schleifkorn und dem in der Temperatur variierenden Bauteil. Eine Übersicht über den Aufbau und Kinematik der Einkornritzversuche sowie die eingesetzten Ritzwerkzeuge und Maschine, kann dem Kapitel 4 entnommen werden. Die Lastsituation aus einem realen Schienenschleifprozess wird anhand der Kenngrößen maximale unverformte Spannungsdicke $h_{cu \max}$ sowie Kontaktlänge l_g nachgebildet. Hierbei entspricht die Ritztauchtiefe t_r der maximalen Spannungsdicke $h_{cu \max}$. Da die Analyse der Spanbildungsmechanismen am Werkstück im Fokus stehen soll, entfällt die Berechnung der schleifscheibenspezifischen Kenngrößen Bindungssteifigkeitskonstante k_b , statische Schneidenzahl S'_{stat} und mittlerer Schneidenrundungsradius r_{sr} .

In jedem Ritzversuch werden für jede der Kombinationen der Ritzwerkstücktemperatur T_r und Ritzumfangsgeschwindigkeit v_r insgesamt 15 Ritzspuren mit Ritzzustellungen $a_{er} = 0 - 0,015 \text{ mm}$ erzeugt. Dabei fallen die tatsächlichen Ritztauchtiefen t_r etwas geringer aus, was durch das ausgeprägte elasto-plastische Materialdehnungsverhalten erklärt werden kann. Die Ritzzustellung a_{er} wird inkrementell mit dem Betrag $a_{er} = 0,001 \text{ mm}$ bei jeder Ritzscheibenumdrehung erhöht, sodass letztlich nach jedem abgeschlossenen Ritzversuch 15 Ritzspuren mit wachsender Spurlänge vorliegen. Zur Auswertung wurden jeweils die 3., 6., 9., und 12. Spur herangezogen. Durch den ausreichenden Abstand zwischen den Spuren von 1,5 mm kann davon ausgegangen werden, dass die Ritzspuren sich in ihrer Ausbildung nicht gegenseitig beeinflussen. Aufgrund der Ritzkinematik ändern sich die Spurenprofile in allen Phasen des Korneingriffes. Zur Bestimmung der geometrischen Parameter wurden mehrere Querschnittsprofile in den jeweiligen Spurmitten auf-

genommen und ausgewertet. Dadurch wurde der von GIWERZEW [GIW03] entwickelter Ansatz einer Analyse von lokal auftretenden Spanbildungsmechanismen und der Betrachtung der momentanen Kraft- und Energiewerten verfolgt.

Die Bewertung der Duktilität der Spanabtrennung erfolgt durch die Analyse des Abtrennfaktors f_{ab} . Dieser Kennwert stellt das Verhältnis des tatsächlich abgetrennten Materialvolumens zu dem Gesamtvolumen der Spurenaufwürfe dar. Hierbei sinkt die Duktilität der Zerspanarbeit mit der Steigerung des Abtrennfaktors f_{ab} . Der Abtrennfaktor f_{ab} wird nach Formel 2-8 berechnet. Dabei fließen die anhand der Spurengeometrieanalyse ermittelten geometrischen Kenngrößen Querschnittsflächen der seitlichen Aufwürfe entlang einer Ritzspur A_1 und A_2 sowie die Ritzquerschnittsfläche A_r in die Berechnung mit ein. Zum besseren Verständnis von Spanabtrennungs- bzw. Materialflussmechanismen wurden des Weiteren die Höhen des ersten Aufwurfes y_1 und des zweiten Aufwurfes y_2 gemessen und analysiert. Als Ritzprozesskennwerte werden die Ritznormal- F_{nr} und Ritztangentialkraft F_{tr} aufgenommen und daraus die zur Erzeugung einer Volumeneinheit notwendige spezifische Ritzenergie e_c berechnet und analysiert.

Im Folgenden sind die relevanten Ergebnisse der Einkornritzversuche exemplarisch für zwei Ritzzustellungen, $a_{er} = 0,003$ mm und $a_{er} = 0,012$ mm, dargestellt. In [Bild 6-2](#) ist der Einfluss der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r sowie der Ritzstellgrößen Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Ritzzustellung a_{er} auf den Abtrennfaktor f_{ab} und die Ritzquerschnittsfläche A_r dargestellt. Für ein besseres Verständnis des dabei stattfindenden Spanfließverhaltens und der damit erzeugten Spurengeometrien sind zusätzlich in [Bild 6-3](#) der Einfluss der genannten Ritzstellgrößen auf die Querschnittsfläche des ersten Aufwurfes A_1 und zweiten Aufwurfes A_2 sowie in [Bild 6-4](#) der Einfluss der Ritzstellgrößen auf die Höhen des ersten Aufwurfes y_1 und zweiten Aufwurfes y_2 aufgeführt. Zur Erklärung der erzielten Ergebnisse sind in [Bild 6-5](#) entsprechende Werte der Ritzkenngrößen Ritztangential- F_{tr} und Ritznormalkraft F_{nr} sowie die spezifische Ritzenergie e_{cr} gezeigt. Bei den weiteren untersuchten Ritzzustellungen, $a_r = 0,006$ mm und $a_r = 0,009$ mm wurden ähnliche Tendenzen festgestellt. Diese Ergebnisse sind im Anhang dieser Arbeit in [Bild 12-1](#), [Bild 12-2](#), [Bild 12-3](#), [Bild 12-4](#) dargestellt.

Unabhängig von der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und der Zustellung a_{er} führt die Steigerung der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r zur sichtbaren Steigerung des Abtrennfaktors f_{ab} . Insbesondere bei der Ritzzustellung $a_{er} = 0,003$ mm ist der Einfluss der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r eindeutig, da der Abtrennfaktor f_{ab} im Temperaturbereich $-60\text{ °C} \leq T_r \leq 80\text{ °C}$ im Schnitt um etwa 32 % wächst. Es ist offensichtlich, dass der Werkstoff bei variierenden Temperaturen ein variables Dehnverhalten und somit nicht konstante Zerspaneigenschaften aufweist, wodurch sich die Volumina des zerspannten Materials und die Spanbildungsmechanismen ändern. Dieses Phänomen wird durch die Betrachtung der erzielten Ritzquerschnittsflächen bestätigt. Mit der Steigerung der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r erfolgt die Reduktion der Ritzquerschnittsfläche A_r um bis zu 35 %. Des Weiteren nehmen die Flächen der seitlichen Aufwürfe A_1 und A_2 und die maximalen Aufwurfhöhen y_1 und y_2 systematisch ab. Weiterhin hat die Temperatur des Ritzwerkstückes T_r eine Auswirkung auf die Form der Aufwürfe. Während diese bei den Temperaturen des Ritzwerkstückes im Bereich $-60\text{ °C} \leq T_r \leq 0\text{ °C}$ eher spitz sind, weisen die seitlichen Aufwürfe bei der Temperaturen im Bereich $20\text{ °C} \leq T_r \leq 80\text{ °C}$ eine eher verrundete Form auf. Die genannten Tatsachen führen zum Schluss, dass sich im untersuchten Temperaturbereich die Übergänge zwischen der elastischen und plastischen Verformung sowie die

Grenzen zwischen der plastischen Verformung und der Spanabtrennung unterscheiden. Dadurch ist die Spanbildung inkonstant. Dies bewirkt eine einfachere, vorhersagbare Auslösung der Werkstoffverdrängung sowie ein geringeres Maß des plastischen Materialfließens bei hohen Temperaturen des Ritzwerkstückes T_r . Der Einfluss der Temperaturen des Ritzwerkstückes T_r auf den Abtrennfaktor f_{ab} ist zwar relativ gering, jedoch ist der Einfluss auf die Geometrie von den Aufwürfen in ähnlicher Weise vorhanden. Dies führt zur Erkenntnis, dass bei höheren Temperaturen des Ritzwerkstückes T_r sprödharte und bei geringen Temperaturen des Ritzwerkstückes T_r duktile Spanbildungsmechanismen vorherrschen.

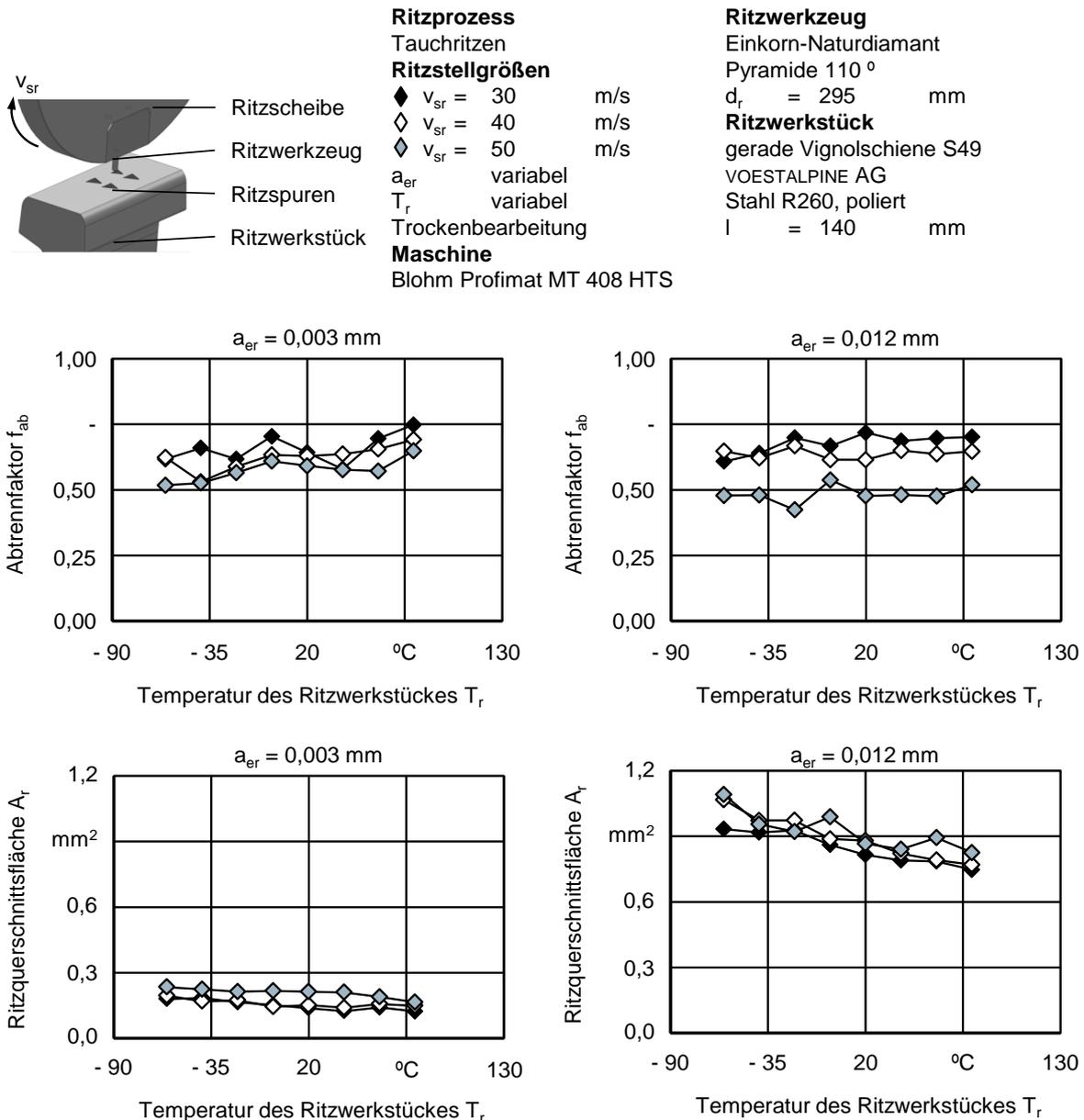


Bild 6-2: Einfluss der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r sowie der Ritzstellgrößen Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Ritzzustellung a_{er} auf den Abtrennfaktor f_{ab} und die Ritzquerschnittsfläche A_r

Durch die Betrachtung des Einflusses der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r auf die Ritznormal- F_{nr} und Ritztangentialkräfte F_{tr} sowie die spezifische Ritzenergie e_{cr} können weitere Erkenntnisse über die temperaturabhängigen Spanbildungsmechanismen beim Schienen-

schleifen gewonnen werden. Bei der Erhöhung der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r im Bereich $-60\text{ °C} \leq T_r \leq 80\text{ °C}$ nehmen die Ritzkräfte um bis zu 70 % zu. Der Grund dafür ist sehr wahrscheinlich, dass durch eine elastische Bearbeitung bei den hohen Werkstücktemperaturen mehr Arbeit für Materialumformung und -verdrängung nötig ist, während es bei den kalten Werkstücken durch eine abfallende Kältebeständigkeit schneller zur Spanbildung und -trennung kommt. Noch besser aufgezeigt werden kann diese These durch die Werte der spezifischen Ritzenergie e_c , die sich mit der Steigerung der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r signifikant erhöhen.

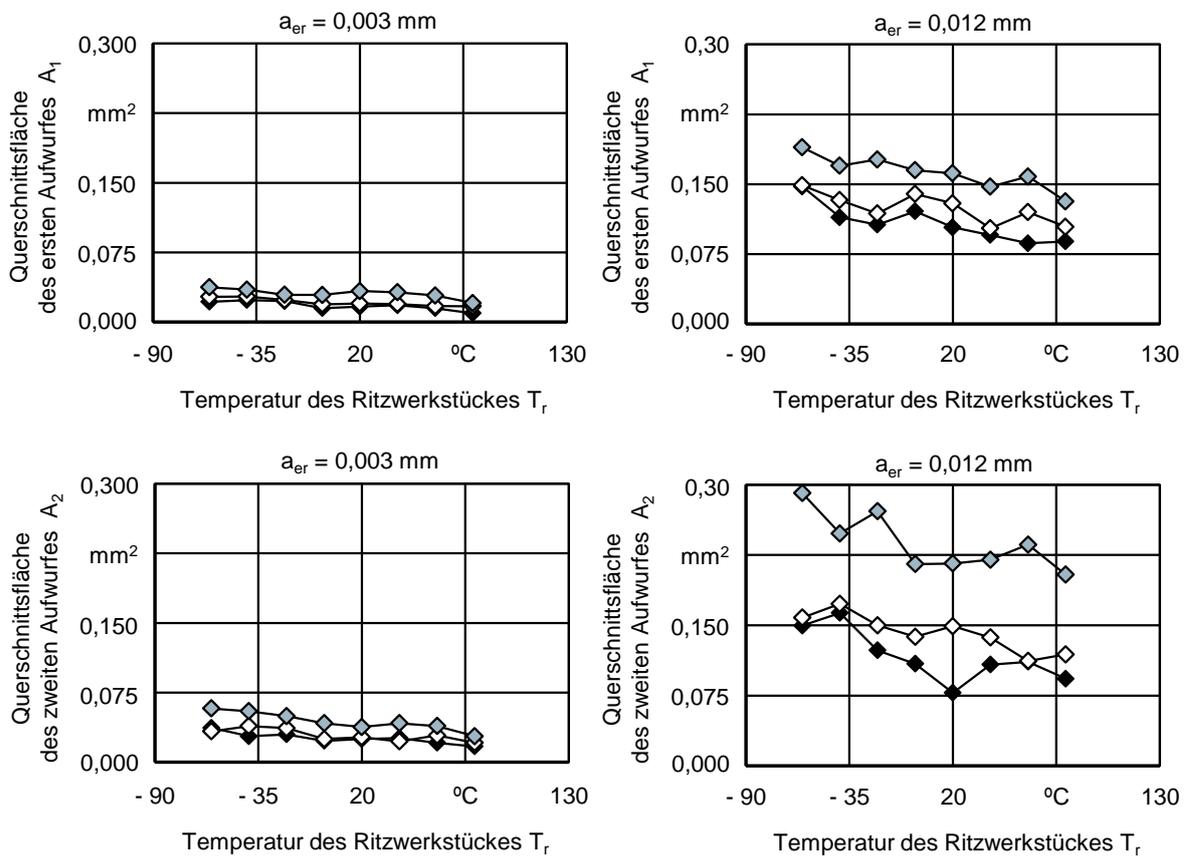
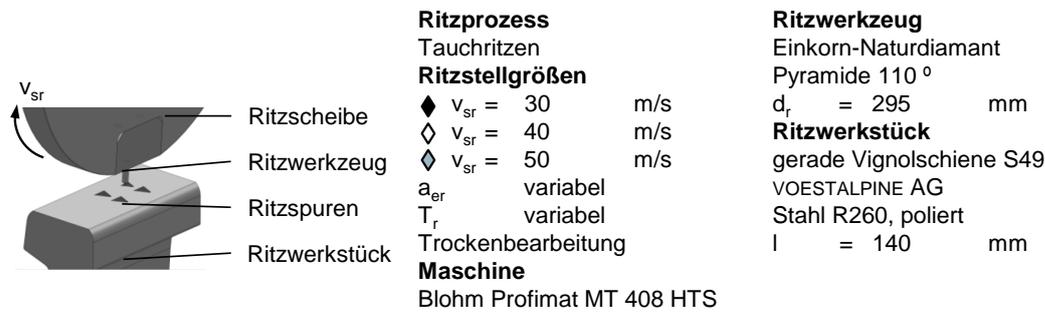


Bild 6-3: Einfluss der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r sowie der Ritzstellgrößen Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Ritzzustellung a_{er} auf die Querschnittsflächen des ersten und zweiten Aufwurfes A_1 und A_2

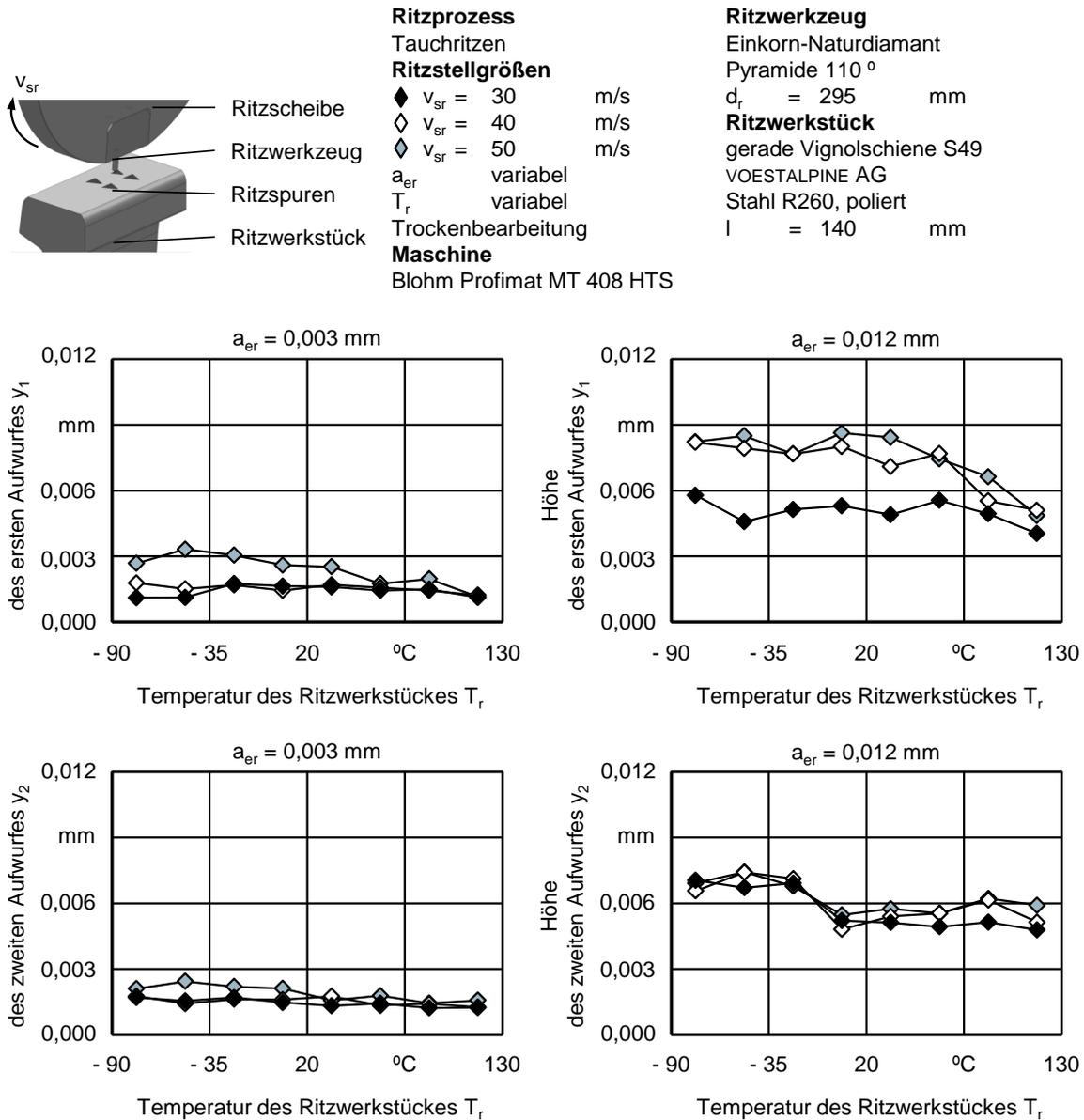


Bild 6-4: Einfluss der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r sowie der Ritzstellgrößen Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Ritzzustellung a_{er} auf die Höhen des ersten und zweiten Aufwurfes y_1 und y_2

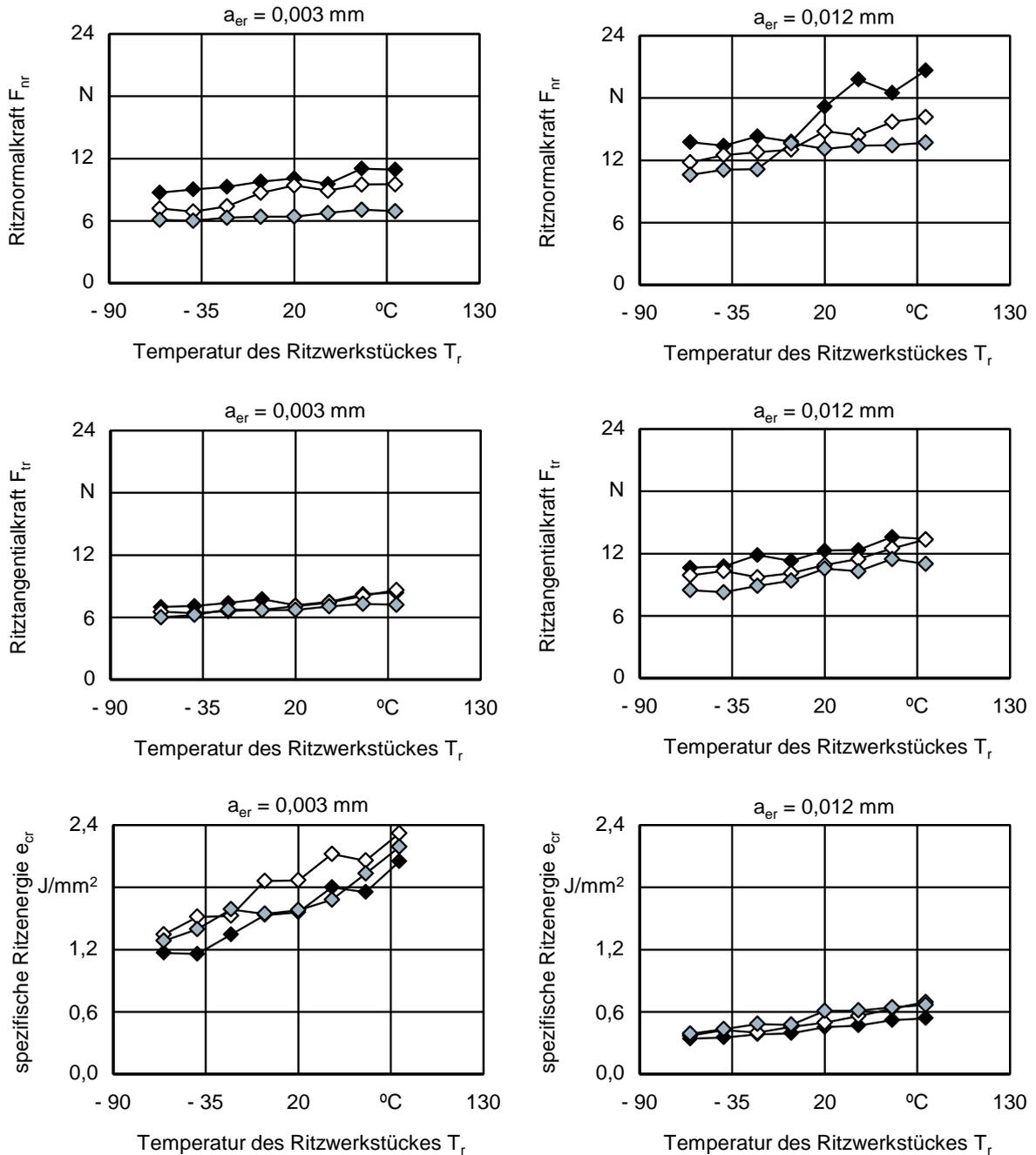
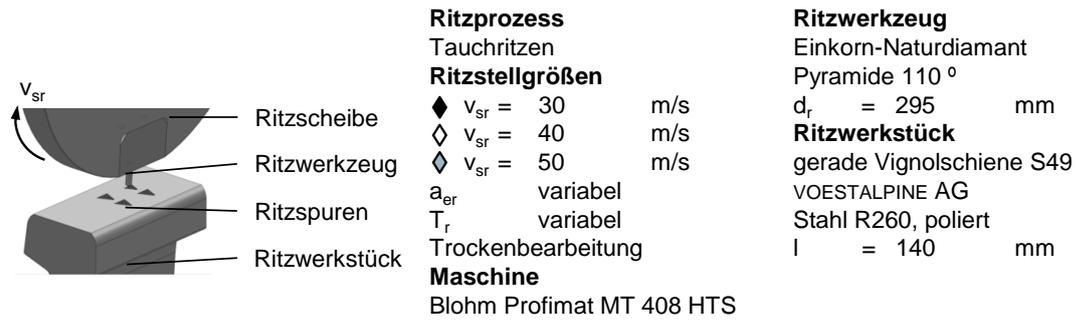


Bild 6-5: Einfluss der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r sowie der Ritzstellgrößen Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Ritzzustellung a_{er} auf die Ritznormal- und Ritztangentialkräfte F_{nr} und F_{tr} sowie spezifische Ritzenergie e_{cr}

Der Einfluss der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} auf die Spanbildungsmechanismen ist unabhängig von der Ritzzustellung a_{er} bei allen Temperaturen des Ritzwerkstückes T_r sichtbar. Aufgrund der ausgewählten Ritzkinematik sind hierbei Aussagen über den Einfluss der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{st} bei gleich bleibenden Spannungsdicken h_{cu} möglich. Die Steigerung der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} führt zu einer tendenziellen Reduktion der Effektivität der Spanabtrennung, da der Abtrennfaktor f_{ab} sinkt. Die Unterschiede zwischen den drei getesteten Ritzumfangsgeschwindigkeiten $v_{sr} = 30 \text{ m/s}$, 40 m/s und 50 m/s sind allerdings relativ gering. Es ist anzunehmen, dass durch die Steigerung der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} eine Steigerung der zeitspezifischen Spannungsdicken (Volumen pro Zeiteinheit) erfolgt, die ihrerseits zu einer Erhöhung des Grades der plastischen Materialverformung und Abnahme des der plastischen Materialverformung unterworfenen Materialvolumens in der Scherebene verursacht. Diese Erkenntnis bestätigt sich durch die Betrachtung der Geometrie der erzeugten Ritzspuren und Spanaufwürfe. Mit der Steigerung der Ritzumfangsgeschwindigkeit werden wesentlich größere Querschnittsflächen der seitlichen Aufwürfe A_1 und A_2 erzielt sowie eine signifikante Steigerung der Höhe der seitlichen Aufwürfe y_1 und y_2 generiert. Dies führt ihrerseits zur Reduktion des Abtrennfaktors f_{ab} . Dies ist eine Indiz für die Zunahme der plastischen Verformung des Werkstoffes.

Auch die Analyse der Kraft- und Energieverläufe bestätigen die Vermutung einer höheren Duktilität der Bearbeitung bei der Steigerung der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} . Hierbei fallen bei der Erhöhung der v_{sr} -Werte die Ritzkräfte ab. Anhand der Betrachtung der Werte der spezifischen Ritzenergie können jedoch keine eindeutigen Unterschiede zwischen den drei getesteten Ritzumfangsgeschwindigkeiten v_{sr} identifiziert werden.

Auch die dritte analysierte Ritzstellgröße, die Ritzzustellung a_{er} , hat einen klaren Einfluss auf die Spanbildungsmechanismen beim Schienenschleifen. Dabei besteht die erste Erkenntnis in der eindeutigen Feststellung der Veränderung des dominierenden Mechanismus der Spanbildung. Während bei der Ritzzustellung $a_{er} = 0,003 \text{ mm}$ dies das Mikropflügen ist, übernimmt bei den höheren Ritzzustellungen $a_{er} \geq 0,006 \text{ mm}$ das Mikrospannen die dominierende Funktion. Dieses Fazit wird durch die relativ geringen Werte des Abtrennfaktors f_{ab} bei den geringen Ritzzustellungen $a_{er} = 0,003 \text{ mm}$ abgeleitet. Insbesondere ist der Einfluss der Ritzzustellung a_{er} naturgemäß auf die geometrischen Parameter der Ritzspuren deutlich. Die Steigerung der a_{er} -Werte bringt eine Erhöhung von A_r , A_1 , A_2 , y_1 , y_2 -Werten mit sich, was durch höhere Volumina des durch das Ritzkorn abgedrängten Materials verursacht wird.

Während bei den relativ geringen Ritzzustellungen $a_{er} = 0,003 \text{ mm}$ und $a_{er} = 0,006 \text{ mm}$ kaum ein Einfluss der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} auf die Ritztangentialkraft F_{tr} zu sehen ist, geht bei der Analyse der beiden höheren Ritzzustellungen $a_{er} = 0,009 \text{ mm}$ und $a_{er} = 0,012 \text{ mm}$ ein deutlicher Zusammenhang hervor: Mit einer Steigerung der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} sinkt die Ritztangentialkraft F_{tr} deutlich. Bei der Analyse der Ritznormalkraft F_{nr} ist dieser Einfluss bei allen untersuchten Ritzzustellungen a_{er} deutlich zu sehen. Die größeren Spannungsdicken sind hinsichtlich der Abtrennarbeit effizienter, weil im Verhältnis weniger Energie für elastische und plastische Anteile benötigt wird.

Interessanterweise kann eine eindeutige Reduktion der spezifischen Energie e_{er} mit der Steigerung der Ritzzustellung a_{er} festgestellt werden, was aufgrund einer unproportional höheren Steigerung der Ritzquerschnittsfläche A_r gegenüber der Ritztangentialkraft F_{tr} zu erklären ist.

Die REM-Aufnahmen der erzeugten Ritzspuren sind exemplarisch in Bild 6-6 für die Ritzzustellung $a_{er} = 0,003$ mm und in Bild 6-7 für die Ritzzustellung $a_{er} = 0,012$ mm dargestellt. Hierbei wird gezeigt, wie zum einen die Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und zum anderen die Temperatur des Ritzwerkstückes T_r die Spurengeometrie beeinflussen. Auf diesen Aufnahmen sind die durch die taktilen Messungen gewonnenen Erkenntnisse sichtbar. Bei einer Steigerung der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} bzw. der Reduktion der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r nehmen die Breite der Ritzspuren sowie die Anzahl und Breite der seitlichen Aufwürfe entlang der Ritzfläche zu.

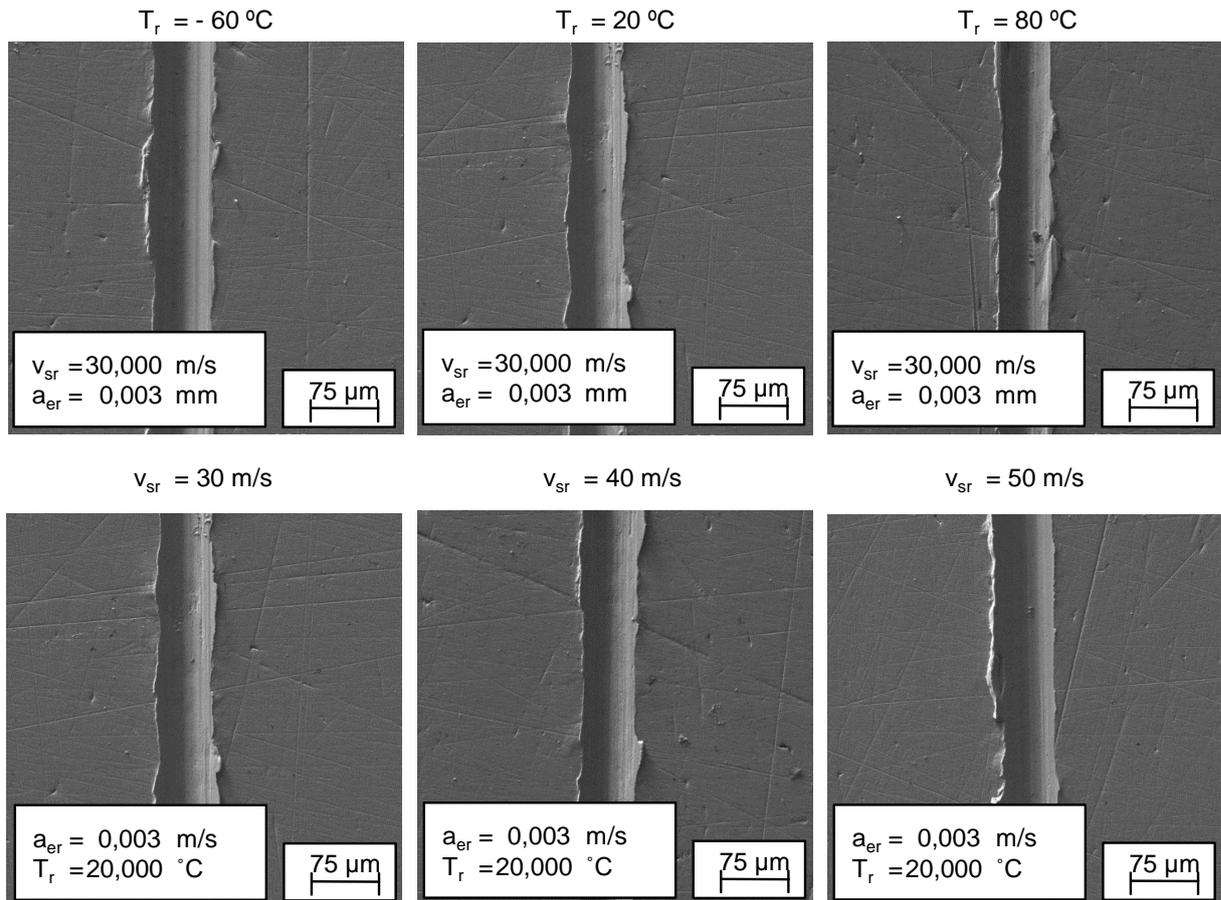


Bild 6-6: REM-Aufnahmen erzeugter Ritzspuren unter Verwendung variabler Temperaturen des Ritzwerkstückes T_r und Ritzumfangsgeschwindigkeiten v_r bei der Ritzzustellung $a_{er} = 0,003$ mm

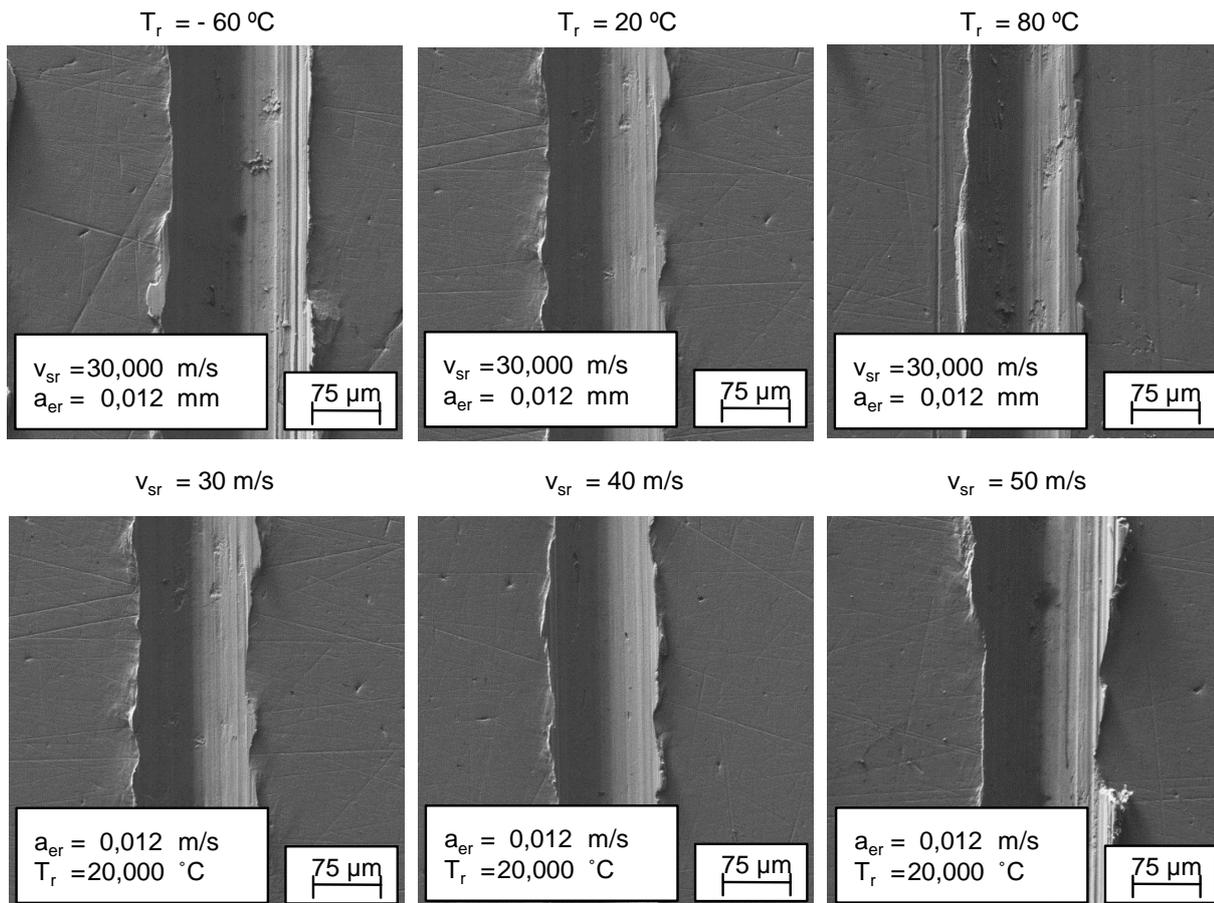


Bild 6-7: REM-Aufnahmen erzeugter Ritzspuren unter Verwendung variabler Temperaturen des Ritzwerkstückes T_r und Ritzumfangsgeschwindigkeiten v_r bei der Ritzzustellung $a_{er} = 0,012\text{ mm}$

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Einkornritzversuche, dass sowohl die Temperatur des Ritzwerkstückes T_r , als auch die Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und die Ritzzustellung a_{er} maßgeblich und eindeutig die Spanbildungsmechanismen beeinflussen. Mit der Reduktion der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r kommt eine duktilere Bearbeitung zu Stande, da sich die mechanischen Materialkennwerte, insbesondere die Bruchzähigkeit und Zerspanbarkeit, verändern und geringere Kräfte und Energien für die Spanumformung und -abtrennung eingebracht werden müssen. Bei warmen Werkstücken ist vermutlich das sogenannte Mikrospanen der dominierende Abtrennmechanismus. Bei kalten Werkstücken erfolgt die Spanabtrennung dagegen nach dem Mikropflügen-Mechanismus. Dabei kommt es zum starken Fließen des Werkstoffes sowie einem starken Stau des Spans vor der Kornspitze. Die Gesamtvolumina des abgetrennten Werkstoffes sind hierbei zwar geringer, als bei dem zuvor beschriebenen sprödharten Spanabtrennmechanismus, jedoch bleibt die Spanabtrennung vorhersagbarer. Die Steigerung der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} verursacht die Steigerung der Duktilität der Schleifbearbeitung, da der Abtrennfaktor f_{ab} sinkt. Durch die Analyse der Ritzzustellung a_{er} wurden die Bereiche der Veränderung der Fließeigenschaften des Werkstoffes Stahl R260 und der Wechsel zwischen dem Mikropflügen zum Mikrospanen als dem dominanten Mechanismus der Spanabtrennung aufgezeigt.

Anschließend erfolgt die Entwicklung deskriptiver Prozessmodelle für die Einkornritzversuche. Diese dienen einer besseren Vorhersage der temperaturabhängigen Spanbildungsme-

chanismen sowie einem tieferen Verständnis über die technologischen Zusammenhänge zwischen den Systemeingangs- und Zielgrößen. Die deskriptiven Prozessmodelle werden mithilfe der multiplen Regressionsanalyse (MLR) unter Verwendung der im Kapitel 4.3 erläuterten Vorgehensweise erarbeitet. Die Zielgrößen des Modells sind die Kenngrößen und Kennwerte zur Beschreibung der Spanabtrennung beim Schienenschleifen. Davon werden insgesamt sechs zur Modellentwicklung herangezogen: Der Abtrennfaktor f_{ab} , die Ritzquerschnittsfläche A_r , die Querschnittsflächen der seitliche Aufwürfe entlang einer Ritzspur A_1 und A_2 , die Ritznormal- F_{nr} und Ritztangentialkräfte F_{tr} sowie die Ritzenergie e_{cr} . Die in Formel 4-1 dargestellte allgemeine Gleichung wird entsprechend für den vorliegenden Fall der drei Eingangsgrößen Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} , Ritzzustellung a_{er} und Temperatur des Ritzwerkstückes T_r angepasst. Das Ergebnis stellt Formel 6-1 dar. Hierbei entsprechen die Eingangsgrößen x_1 , x_2 und x_3 den variierenden Ritzstellgrößen, β_0 ist der Achsenabschnitt, $\beta_1 - \beta_3$ sind Koeffizienten für unabhängige Eingangsgrößen, $\beta_4 - \beta_6$ sind Koeffizienten für die Wechselwirkungen erster Ordnung sowie $\beta_7 - \beta_9$ sind die Koeffizienten für quadratische Anteile. Unter Verwendung der gelieferten Koeffizienten erfolgt die Erstellung von jeweils einer Gleichung für jede zu untersuchende Zielgröße. Wie auch schon bei der Darstellung der experimentellen Ergebnisse der Einkornritzversuche werden auch die für die Ritzzustellungen $a_{er} = 0,003$ mm und $0,012$ mm erzielten Regressionsmodelle exemplarisch dargestellt.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_4 \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_5 \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_6 \cdot x_2 \cdot x_3 + \beta_7 \cdot x_1^2 + \beta_8 \cdot x_2^2 + \beta_9 \cdot x_3^2 \quad (6-1)$$

Die Koeffizienten für die Modellgleichungen unter Berücksichtigung der Faktoren, Faktorwechselwirkungen und quadratischen Wirkungen für die Zielgrößen Y_i sind in Tabelle 6-1 angegeben. Hierbei muss beachtet werden, dass die aufgezählten Koeffizienten der Modelle nicht den codierten Eingangsgrößen entsprechen. Zur Bewertung der Signifikanz wurden die Messwerte selbstverständlich codiert. Weiterhin soll die Tatsache Berücksichtigung finden, dass der der Modellbildung zugrunde liegende Versuchsplan keinen reinen 3^k -Versuchsplan darstellt, da bei der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r acht Stufen und bei der Ritzzustellung a_{er} vier Stufen zur Modellerstellung herangezogen werden.

Tabelle 6-1: Koeffizienten für das Regressionsmodell
zur Vorhersage der Kenngrößen und Kennwerten
zur Beschreibung der Spanabtrennung beim Schienenschleifen

Koeffizient β_i	f_{ab}	A_r	A_1	A_2	F_{nr}	F_{tr}	e_{cr}
β_1	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$-1,93 \cdot 10^{-3}$	$-4,79 \cdot 10^{-3}$	$-1,11 \cdot 10^{-2}$	$7,34 \cdot 10^{-2}$	0,21	$7,99 \cdot 10^{-2}$
β_2	$-4,01 \cdot 10^{-2}$	$6,49 \cdot 10^{-2}$	$-5,12 \cdot 10^{-4}$	$0,23 \cdot 10^{-2}$	0,80	0,25	-0,45
β_3	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$3,25 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$5,96 \cdot 10^{-2}$	$8,03 \cdot 10^{-3}$	$5,74 \cdot 10^{-3}$
β_4	$-4,97 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^{-4}$	$3,03 \cdot 10^{-4}$	$5,67 \cdot 10^{-4}$	$-2,35 \cdot 10^{-3}$	$-1,11 \cdot 10^{-2}$	$-3,33 \cdot 10^{-4}$
β_5	$-1,44 \cdot 10^{-6}$	$-5,21 \cdot 10^{-6}$	$-2,84 \cdot 10^{-6}$	$-3,75 \cdot 10^{-6}$	$-1,16 \cdot 10^{-3}$	$-1,39 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$
β_6	$-6,00 \cdot 10^{-5}$	$-1,50 \cdot 10^{-4}$	$-3,01 \cdot 10^{-5}$	$-3,81 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-3}$	$-4,11 \cdot 10^{-4}$
β_7	$-1,84 \cdot 10^{-4}$	$5,77 \cdot 10^{-5}$	$5,91 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$-2,57 \cdot 10^{-3}$	$-2,66 \cdot 10^{-3}$	$-9,12 \cdot 10^{-4}$
β_8	$3,94 \cdot 10^{-3}$	$6,44 \cdot 10^{-4}$	$4,29 \cdot 10^{-4}$	$-1,96 \cdot 10^{-3}$	$-4,44 \cdot 10^{-3}$	$4,22 \cdot 10^{-2}$	$2,30 \cdot 10^{-2}$
β_9	$2,79 \cdot 10^{-6}$	$2,36 \cdot 10^{-6}$	$3,34 \cdot 10^{-8}$	$3,94 \cdot 10^{-7}$	$-1,54 \cdot 10^{-5}$	$2,33 \cdot 10^{-5}$	$5,42 \cdot 10^{-6}$
β_0	0,51	$-8,29 \cdot 10^{-2}$	$9,03 \cdot 10^{-2}$	0,15	7,35	3,12	1,10
R^2	81,00	96,50	92,62	98,45	93,98	89,00	95,40

In Bild 6-8 sind die Conturplots der Modellzielgrößen Abtrennfaktor f_{ab} , Ritzquerschnittsfläche A_r , Querschnittsflächen der ersten und zweiten Aufwürfe A_1 und A_2 , Ritztangentialkraft F_{tr} sowie der spezifischen Ritzenergie e_{cr} in Abhängigkeit der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Temperatur des Ritzwerkstückes T_r für die Ritzzustellung $a_{er} = 0,003$ mm dargestellt. Hierbei ist der leichte Einfluss der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r auf den Abtrennfaktor f_{ab} und die spezifische Ritzenergie e_{cr} sichtbar, während andere Ritzstellgrößen eher in einem engen Bereich variieren. Diese Ergebnisse sind nachvollziehbar, da bei der Ritzzustellung $a_{er} = 0,003$ mm tendenziell das Mikropflügen als dominierender Spanbildungsmechanismus vorherrscht und dabei sehr geringe Volumina des Materials verdrängt bzw. abgetrennt werden. Dies führt logischerweise dazu, dass die erzielten Ritzspuren sich nur marginal unterscheiden. In Bild 6-9 sind die Conturplots der Modellzielgrößen Abtrennfaktor f_{ab} , Ritzquerschnittsfläche A_r , Querschnittsflächen der ersten und zweiten Aufwürfe A_1 und A_2 , Ritztangentialkraft F_{tr} sowie der spezifischen Ritzenergie e_{cr} in Abhängigkeit der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Temperatur des Ritzwerkstückes T_r für die Ritzzustellung $a_{er} = 0,012$ mm gezeigt. In diesem Fall einer relativ hohen Ritzzustellung a_{er} ist die eindeutige Veränderung aller Modellzielgrößen in Abhängigkeit der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Temperatur des Ritzwerkstückes T_r sichtbar. In Bild 12-5 und Bild 12-6 sind ferner die Conturplots für weitere untersuchte Ritzzustellungen gezeigt.

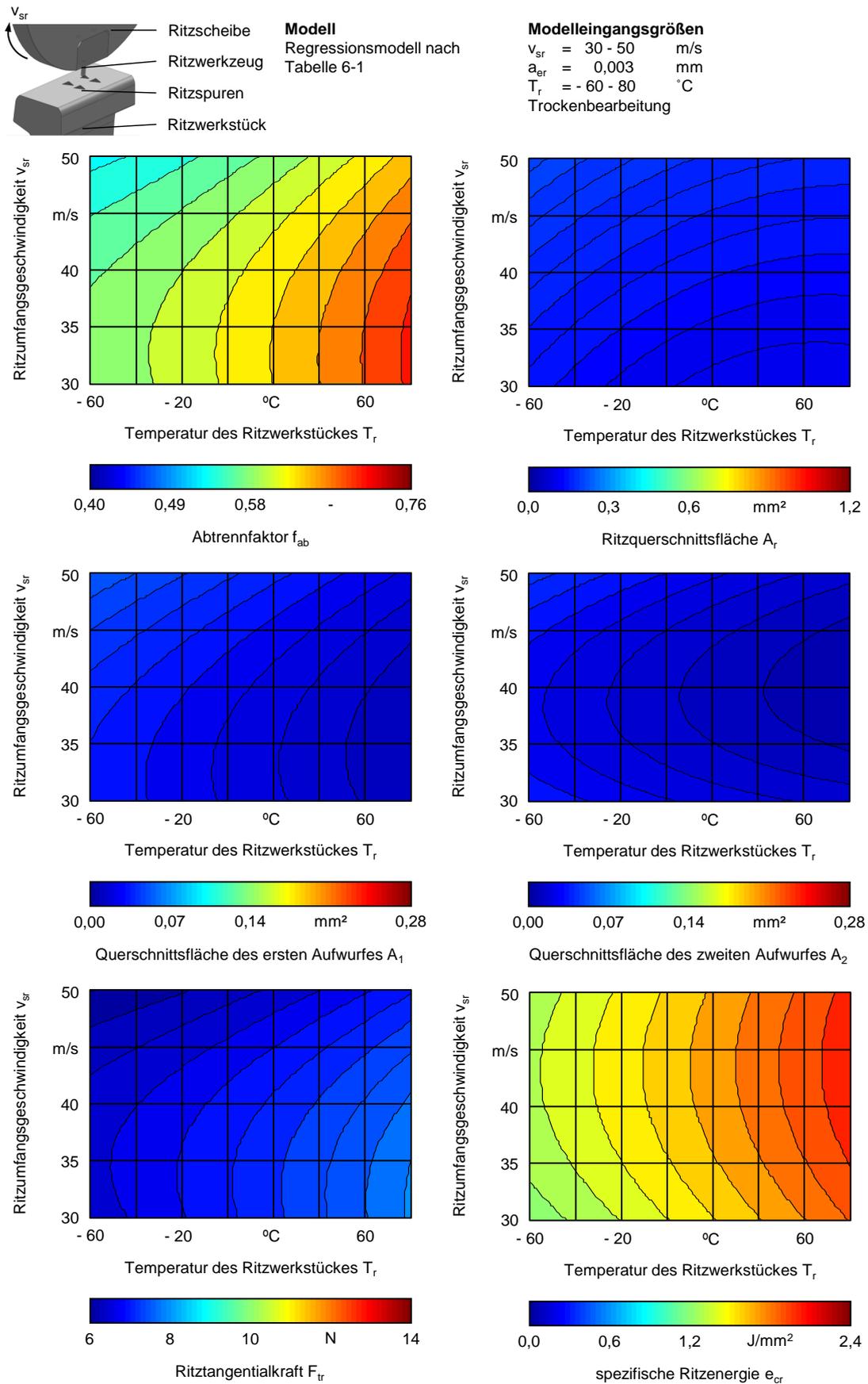


Bild 6-8: Conturplots der relevanten Zielgrößen des Regressionsmodells zur Vorhersage der Kenngrößen zur Beschreibung der Spanabtrennung beim Schienenschleifen für die konstante Ritzzustellung $a_{er} = 0,003$ mm

6 Spanbildungsmechanismen beim Schienenschleifen

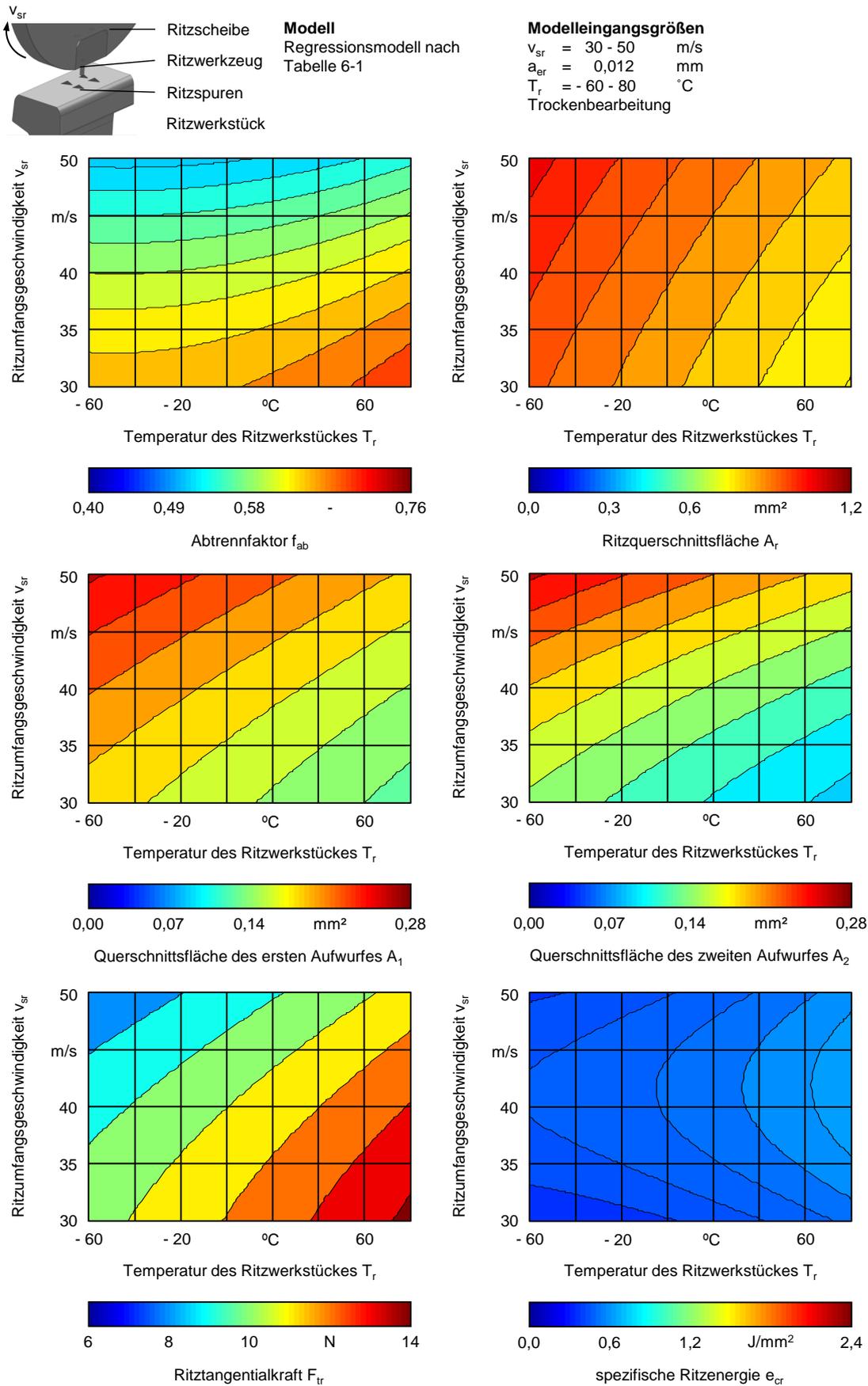


Bild 6-9: Conturplots der relevanten Zielgrößen des Regressionsmodells zur Vorhersage der Kenngrößen zur Beschreibung der Spanabtrennung beim Schienenschleifen für die konstante Ritzzustellung $a_{er} = 0,012$ mm

Zur Verifikation des erarbeiteten Modells werden drei Ritzstellgrößenkombinationen definiert und damit unter Berücksichtigung der statistischen Absicherung neun zusätzliche Einkornritzversuche durchgeführt. Diese Versuchsergebnisse werden mit den modellierten Werten gegenübergestellt. In Bild 6-10 ist der Kurvenverlauf der entwickelten Regression als Ein-Faktor-Modell für die Zielgrößen Abtrennfaktor f_{ab} sowie die Ritztangentialkraft F_{tr} samt der zur Verifikation des Modells herangezogenen drei empirischen Datenpunkte abgebildet. Hierbei variiert die Temperatur des Ritzwerkstückes T_r als einzige Modelleingangsgröße, während die Ritzumfangsgeschwindigkeit $v_{sr} = 30$ m/s und die Ritzzustellung $a_{er} = 0,012$ mm konstant gehalten werden. Es zeigt sich, dass die durch das Modell errechneten Verläufe von den gemessenen Werten nur gering abweichen, was auf eine gute Aussagekraft des entwickelten Modells zur Vorhersage der Kenngrößen und Kennwerten zur Beschreibung der Spanabtrennung beim Schienenschleifen schließen lässt.



- Regressionsmodell nach Tabelle 6-1
- ◆ Zur Verifikation des Modells herangezogenen Messpunkte

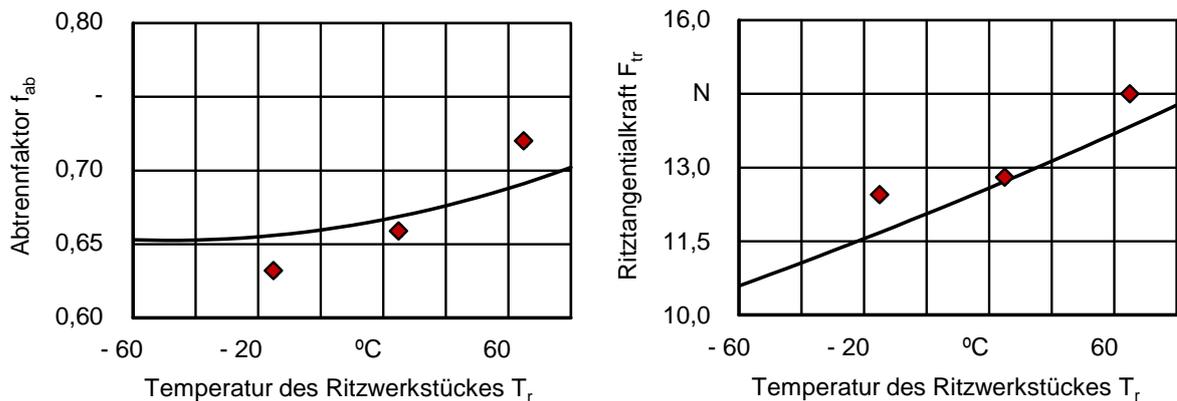


Bild 6-10: Experimentelle Verifikation des Regressionsmodells zur Vorhersage der Kenngrößen zur Beschreibung der Spanabtrennung beim Schienenschleifen

7 Einfluss der Schientemperatur und prozesseitiger Randbedingungen auf die Prozesskenngrößen und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen

7.1 Allgemeines

Trotz der breiten Anwendung und der stetig steigenden Relevanz des Schienenschleifens liegen derzeit kaum systematische Erkenntnisse bzgl. des technologischen Zusammenhanges zwischen den werkzeug- und prozesseitigen Stellgrößen mit den Bearbeitungsergebnissen vor. Wie im Stand der Erkenntnisse dargelegt, unterscheiden sich daher oft die eingesetzten Kinematiken in Abhängigkeit des Verkehrszweiges sowie der dem Reparaturdienstleister zur Verfügung stehenden Maschinentechniken. Die größte Verbreitung unter den Schienenschleifverfahren, insbesondere im Orts- und Nahverkehr, hat das Längs-Umfangs-Planschleifen am Schienenkopf unter Verwendung zylindrischer Schleifscheiben. Dieses Verfahren wird zur Entfernung von Riffeln, Welligkeiten sowie der durch den Rollkontakt ermüdeten Schichten eingesetzt. Hierbei werden konstante Schleifbreiten a_p sowie Schleifzustellungen a_e realisiert, wodurch dieses Verfahren gut zur Abbildung unter Laborbedingungen an einer Schleifmaschine geeignet ist.

Eine ausreichende Oberflächenqualität nach dem Schleifen ist zur Sicherstellung der optimalen tribologischen Bedingungen für den Rad/Schiene-Kontakt ausschlaggebend. Dies führt zur Verminderung des Radverschleißes beim Überfahren der Strecke aber auch zur Reduktion der Überfahrgeräusche. Als das zu erreichende Kriterium hinsichtlich der Oberflächenqualität kann einzig für den arithmetischen Mittelwert der Profilordinaten eine Grenze $R_a < 10 \mu\text{m}$ aus der Norm [DIN EN 13231] entnommen werden. Aus schleiftechnischer Sicht stellt dieses Maß einen eher konservativen Wert dar, was in den Untersuchungen zum Schienenschleifen von UHLMANN ET AL. [UHL14b] bestätigt wurde. UHLMANN ET AL. [UHL14b] konnten die Rauheiten $R_a \approx 2 \mu\text{m}$ schon ohne zusätzliche prozess- bzw. werkzeugseitige Optimierung durch das Schienenschleifen erzielen. Im Zuge der derzeit sozialpolitisch angestrebten Maßnahmen zur Reduktion der Lärmbelastung der Schienenstrecken im Orts- und Nahverkehr ist die Senkung des durch die Norm seit Jahrzehnten festgehaltenen Grenzmaßes für die zu erzielende Rauheit nach dem Schleifen $R_a < 10 \mu\text{m}$ durchaus sinnvoll und denkbar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird den Oberflächenkennwerten daher absichtlich eine große Aufmerksamkeit geschenkt. Der Forschungsfokus liegt auf der Analyse des Einflusses der Temperatur der Schiene und Prozessstellgrößen auf die Rauheitskennwerte und dem Ableiten der Potenziale zu deren Verbesserung. In der vorliegenden Arbeit werden für ein besseres Verständnis über die Topographie der durch das Schienenschleifen erzeugten Oberflächen außer des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinaten R_a zwei weitere Oberflächenkennwerte, die mittlere größte Höhe des Profils R_z und des Materialanteils R_{mr} (5 %; $-0,4 \mu\text{m}$), gemessen und analysiert.

Als das Reparaturverfahren ist das Schienenschleifen stark von den Umgebungsrandbedingungen beeinflusst. Hierbei soll eine besondere Aufmerksamkeit der variablen Schientemperaturen geschenkt werden, die sich in Abhängigkeit der Jahreszeit und Region bedeu-

tend unterscheiden können. Nach derzeitigem Stand der Technik wird dieser Einflussfaktor jedoch weder in der Normung, noch in der Forschungsliteratur berücksichtigt. Das bedeutet, dass die Schienenschleifprozesse sowohl im Winter, als auch Sommer ohne nennenswerte werkzeug- bzw. prozesseitige Anpassungen durchgeführt werden. Es ist des Weiteren bekannt, dass einige Verkehrsunternehmen und Reparaturdienstleister eine Schleifbearbeitung bei Umgebungstemperaturen $T_u < 0\text{ °C}$ grundsätzlich vermeiden. Aufgrund ihres Kohlenstoffgehaltes im Bereich $0,62\% < C < 0,80\%$, des feinperlitischen Gefüges und eines geringen Gehaltes an weiteren Legierungselementen haben Schienenstähle sehr wahrscheinlich eine variable Kerbschlagzähigkeit im Bereich der Temperaturen $-100\text{ °C} < T < 100\text{ °C}$. Im Rahmen der Einkornritzversuche wurde aufgezeigt, dass mit der Steigerung der Werkstücktemperatur im Bereich $-60\text{ °C} < T_r < 80\text{ °C}$ eine zunehmende Duktilität der Spanbildung und -abtrennung erfolgt. In dem aktuellen Kapitel wird der Einfluss der Schientemperatur T_s und der damit verbundenen variablen Duktilität der Bearbeitung bzgl. des Einflusses auf die Bearbeitungsergebnisse untersucht und bewertet. Die Überprüfung der Übertragbarkeit von Ergebnissen der Ritzversuche auf die schleiftechnischen Ergebnisse erfolgt werkstückbasiert, d. h. die kinematischen und porenvolumetrischen Parameter von Schleifwerkzeugen werden zunächst nicht variiert. Auf dieser Basis werden Empfehlungen hinsichtlich der Auswahl geeigneter werkzeug- und prozesseitiger Stellgrößen individuell für konkrete Schientemperaturen T_s erarbeitet.

Durch die Trockenbearbeitung in Kombination mit hohen bezogenen Zeitspannungsvolumina ist das Schienenschleifen ein hinsichtlich thermischer Randzonenbeeinflussung kritisches Bearbeitungsverfahren. Konkret führt das Schienenschleifen zu einer Kombination der Intensität und Dauer der Wärmeexposition, was zu hohen Kontakttemperaturen zwischen dem Werkzeug und den Schienen führt. Die hierdurch erzeugte Wärme fließt vermehrt in die Schiene hinein und somit eine Veränderung des Gefügestandes, der Materialeigenspannungen sowie der Härtungstiefe verursachen. Die thermische Einwirkung auf die Bauteilrandzone ist ein bekanntes Problem derjenigen Schleifverfahren, die sich hinsichtlich der Bereiche der Prozessstellgrößen zwischen dem Pendel- und Tiefschleifen befinden. UHLMANN ET AL [UHL14b, UHL12] und FAU ET AL. [FAU15] zeigen exemplarisch auf, dass eine nicht korrekte Auswahl der Schleifstellgrößen zu diversen Oberflächen- und Randzonenschädigungen führen kann. Wie Bild 7-1 zeigt, sind Mikrorisse und Aufhärtungen des randzonennahen Bereiches mögliche Folgen davon. Die Schienenrandzone soll als eine tribologisch hoch beanspruchte Funktionsfläche nahezu schädigungsfrei bleiben, damit ein ausreichender Verschleißwiderstand gewährleistet werden kann.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Tatsachen wird der Fokus der technologischen Untersuchungen auf eine Analyse des Einflusses der Schientemperatur im Zusammenspiel mit den Prozessstellgrößen auf die Oberflächen- und Randzonenqualität der Schienen gelegt. Des Weiteren soll geklärt werden, inwieweit unterschiedliche Schmiermengen sowie Werkzeugzusammensetzungen die Arbeitsergebnisse beim Schienenschleifen beeinflussen. Anschließend erfolgt die Untersuchung und das Aufzeigen des Einflusses der Hochleistungsschleifbearbeitung, erzielt durch gesteigerte Werte der Zustellungen a_e und Vorschubgeschwindigkeiten v_f , auf die Bearbeitungsergebnisse. Zur Erreichung dieser Ziele werden vier Reihen technologischer Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse in den separaten Unterkapiteln des Kapitels 7 dargestellt sind.

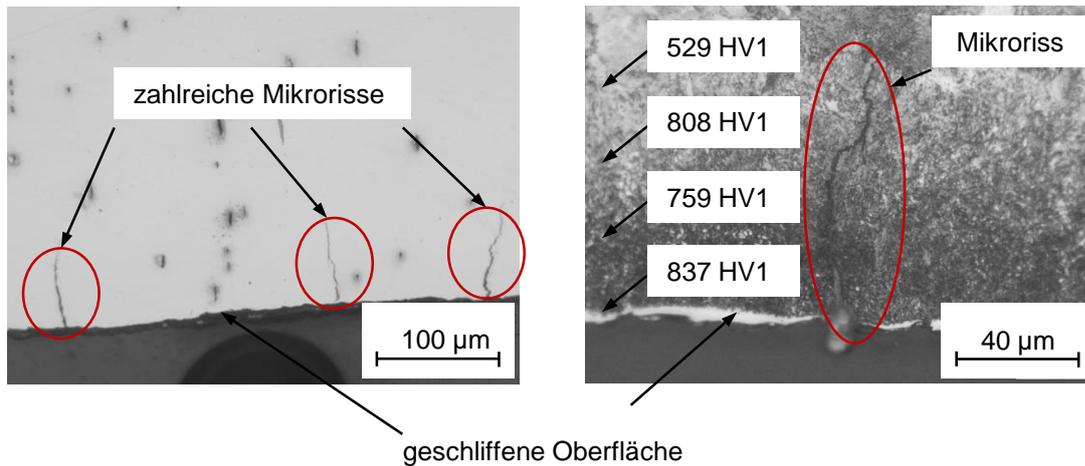


Bild 7-1: Mögliche Randzonenschädigungen durch eine hochproduktive Schienenschleifbearbeitung

Der Einfluss der Werkstücktemperierung auf die Bearbeitungsergebnisse wird untersucht, indem die Schienen systematisch auf Temperaturen von $T = -60\text{ °C}$ bis $T = 80\text{ °C}$ gebracht werden. Die Stellgrößen beim Längs-Umfangs-Planschleifen beeinflussen die Prozesskennwerte, Bearbeitungsergebnisse und das Einsatzverhalten endbearbeiteter Bauteile nachhaltig. Im Folgenden werden die bekannten funktionalen Zusammenhänge zwischen den Stellgrößen und dem Einfluss auf die verursachten mechanisch-physikalischen Prozesse im Werkstück kombiniert mit den Oberflächen- und Randzonenkennwerten vorgestellt. Diese Informationen sind für eine verbesserte Interpretation der beim Schienenschleifen erzielten Ergebnisse relevant und für eine nachfolgende prozesseitige Optimierung der Bearbeitung richtungsweisend. Es wird des Weiteren detailliert darauf eingegangen, wie die in den technologischen Untersuchungen eingesetzten Stellgrößenbereiche identifiziert wurden.

Durch eine korrekte Auswahl der Umfangsgeschwindigkeit v_s kann die Oberflächenqualität maßgeblich verbessert werden. Allerdings soll darauf geachtet werden, dass aufgrund höherer Intensität der Einzelkornkontakte dabei höhere Wärmeeinträge und daraus resultierend größere thermische Schädigungen der Randzone verursacht werden können. Die für das Schienenschleifen eingesetzten Korundschleifwerkzeuge sind größtenteils für Umfangsgeschwindigkeiten von $v_s \leq 50\text{ m/s}$ zugelassen. Die eingesetzten Schienenschleiftechniken sind meistens in der Lage, Umfangsgeschwindigkeiten $v_s = 20 - 50\text{ m/s}$ zu realisieren. Für die angestrebte systematische Untersuchung des Schienenschleifens werden daher Umfangsgeschwindigkeiten $v_s = 30\text{ m/s}$, 40 m/s und 50 m/s systematisch variiert und deren Einfluss auf die Bearbeitungsergebnisse untersucht. Diese stimmen weiterhin mit drei bei den Einkornritzversuchen untersuchten Ritzumfangsgeschwindigkeiten $v_{sr} = 30\text{ m/s}$, 40 m/s und 50 m/s überein. Damit ist eine Grundlage zum tiefergehenden technologischen Verständnis untersuchter Schleifprozesse unter Berücksichtigung der dabei stattfindenden Spanumformungs- und Spanbildungsmechanismen vorhanden.

Die Vorschubgeschwindigkeit v_f ermöglicht einen direkten Einfluss auf die Bearbeitungszeiten t und somit die Wirtschaftlichkeit der Schleifbearbeitung. Hierbei ist zu beachten, dass zu hohe Vorschubgeschwindigkeiten v_f aufgrund der Steigerung der Spannungslängen l_g die erzielten Oberflächenqualitäten zumeist negativ beeinflussen. Zu geringe Werte der Vorschubgeschwindigkeit v_f können in Kombination mit relativ großen Zustellungen und der für das

Schienenschleifen üblichen Trockenbearbeitung aufgrund der hohen lokalen Schleifkontaktzeiten Δt hingegen zu hohen Energie- und Wärmeeinträgen in die Schiene führen. In dem betrachteten Anwendungsfall des Längs-Umfang-Planschleifens an geraden Schienenstrecken im Orts- und Nahverkehr variieren die Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich $v_f = 5 - 70$ m/min. Im Rahmen der Vorversuche wurde festgestellt, dass Vorschubgeschwindigkeiten $v_f = 7 - 12$ m/min hinsichtlich der Wärmeeinträge in die Schiene kritisch sind, da damit aufgrund der hohen Kontaktzeit Δt teilweise massive Gefügeveränderungen in Form von Rissbildung und Oberflächenzerrütung aber auch sofort sichtbare Anlauffarben der geschliffenen Oberfläche verursacht wurden. Bei Vorschubgeschwindigkeiten $v_f \geq 17$ m/min wurde im Rahmen der Vorversuche hingegen eine Reduktion der Schädigung der Bearbeitung festgestellt, so dass für die technologischen Untersuchungen zum Schienenschleifen drei Vorschubgeschwindigkeiten, $v_f = 17$ m/min, 22 m/min und 27 m/min ausgewählt werden.

Die Zustellung a_e stellt eine weitere Schleifstellgröße dar, die für die Produktivität der Schleifarbeit und somit die Wirtschaftlichkeit des Schienenschleifens zuständig ist, da diese direkt die abgetrennten Materialvolumina beeinflusst. Wird die Zustellung a_e erhöht, hat das einen direkten Einfluss auf die Steigerung der Spannungsdicke h_{cu} , was wiederum aufgrund der höheren Energien zur Spannumformung und -abtrennung zu höheren Wärmeeinträgen in das Bauteil und thermischen Schädigungen der Randzone führen kann. Des Weiteren beeinflusst die Steigerung der Spannungsdicke h_{cu} naturgemäß aufgrund der Steigerung der Höhe der Rauheitsspitzen umgekehrt proportional die erzielte Oberflächenqualität. Bei industrieüblichen Schienenschleifprozessen liegt die Zustellung a_e in Abhängigkeit des Maschinenbedieners und der eingesetzten Schleiftechniken in einem für die schleiftechnischen Verhältnisse sehr breiten Bereich $a_e = 0,005 - 0,1$ mm. Für die technologischen Untersuchungen zum Schienenschleifen werden drei Werte der Zustellung, $a_e = 0,007$ mm, 0,014 mm und 0,021 mm herangezogen und hinsichtlich des Einflusses auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte analysiert.

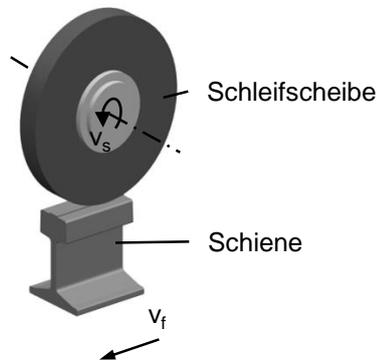
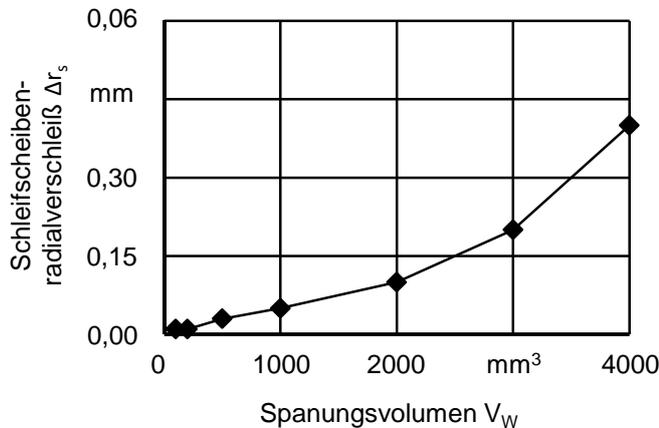
Wie oben erwähnt, beeinflussen sowohl die Zustellung a_e als auch die Vorschubgeschwindigkeit v_f die Produktivität der Schleifbearbeitung. Diese beiden Kenngrößen fließen in die Berechnung einer weiteren Kenngröße, des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w , mit ein, Formel 2-3. Unter Berücksichtigung der zuvor genannten ausgewählten Bereiche der Zustellungen a_e und Vorschubgeschwindigkeiten v_f ergeben sich für die technologischen Untersuchungen zum Schienenschleifen die bezogenen Zeitspannungsvolumina $Q'_w = 1,98 - 7,71$ mm³/mms.

Die ausgewählten Bereiche der Prozessstellgrößen sind oben aufgelistet und entsprechen den in der Branche üblichen Werten. Die Variation der Prozessstellgrößen wird vollfaktoriell durchgeführt. Im Mittelpunkt steht dabei die Ermittlung der signifikanten Einflussgrößen auf die Bearbeitungsergebnisse. Neben der Ermittlung der Oberflächenkennwerte erfolgt nach jedem Versuch die zerstörungsfreie Analyse der Randzonenbeschaffenheit unter Anwendung der im Kapitel 5 entwickelten Verfahren und Vorgehensweise mithilfe der zwei mikromagnetischer Kenngrößen maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} und Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} . Zusätzlich dazu erfolgen in regelmäßigen Abständen Analysen der Härtungstiefe der Randzone CHD HV0,3 sowie REM- und lichtmikroskopische Aufnahmen an zerstörten Schienenproben. Ferner wird im Kapitel 7 unabhängig von den erzielten Randzonenzuständen bei deren Charakterisierung zunächst

absichtlich auf den Begriff „Schädigung“ verzichtet, da die Bewertung der Radzonenqualität nachfolgend im Kapitel 8 erfolgt. Es wird daher bei der Beschreibung der Randzonenzustände mit den tatsächlich erzielten Werten der Einhärtungstiefe CHD HV 0,3, der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} und der Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} und gegebenenfalls darauf aufbauend mit den qualitativen Aussagen über das Maß der Randzonenveränderung gearbeitet.

Zur Beschreibung der Prozessinteraktionen und Analyse des Prozessverhaltens werden die Prozesskennwerte bezogene Schleifnormal- F'_n und Tangentialkraft F'_t , gemessen und daraus die Leistungs- und Energiekenngrößen, kontaktflächenbezogene Schleifleistung P''_c , kontaktflächenbezogene Schleifenergie E''_c und spezifische Schleifenergie e_c abgeleitet und analysiert. Die Bewertung der Randzonen hinsichtlich der Einsetzeignung erfolgt im Anschluss an die Schleifversuche mithilfe tribologischer Untersuchungen, dessen Ergebnisse Kapitel 8 entnommen werden können. Die somit erzielten Grundlagenforschungsergebnisse werden auf praxisnahe Anwendungen übertragen und bewertet, Kapitel 9.

Der Werkzeugverschleiß ist für die eingesetzten Korundwerkzeuge in Kombination mit den gewählten Stellgrößenbereichen relativ gering, Bild 7-2. Aus diesem Grund wird auf Langzeituntersuchungen der Schleifwerkzeuge verzichtet. Die eingesetzten Schleifwerkzeuge werden zur Schaffung konstanter Versuchsbedingungen in regelmäßigen Abständen abgerichtet. Dabei werden die im Kapitel 4.7 dargelegten Vorgehen und Abrichtparameter verwendet. Das Abrichten der Schleifwerkzeuge erfolgt nach Abtrennung des definierten Spannungsvolumens $V_W = 940,8 \text{ mm}^3$.



Schleifwerkzeuge
 zylindrische Schleifscheibe
 STELLA KERAMIK
 300 x 30 x 127 mm³
 Korngröße 20 Mesh
 Kunstharzbindung
 100 % Schmelzkorund
 Härte Q (hochhart)
 Struktur 4
Werkstück / Schiene
 gerade Vignolschiene S49
 VOESTALPINE AG
 Stahl R260
 $l = 140 \text{ mm}$
 $T_s = 20 \text{ °C}$

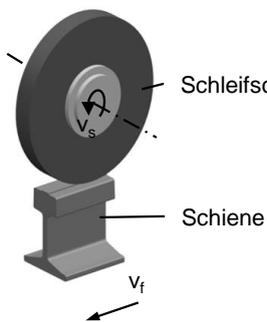
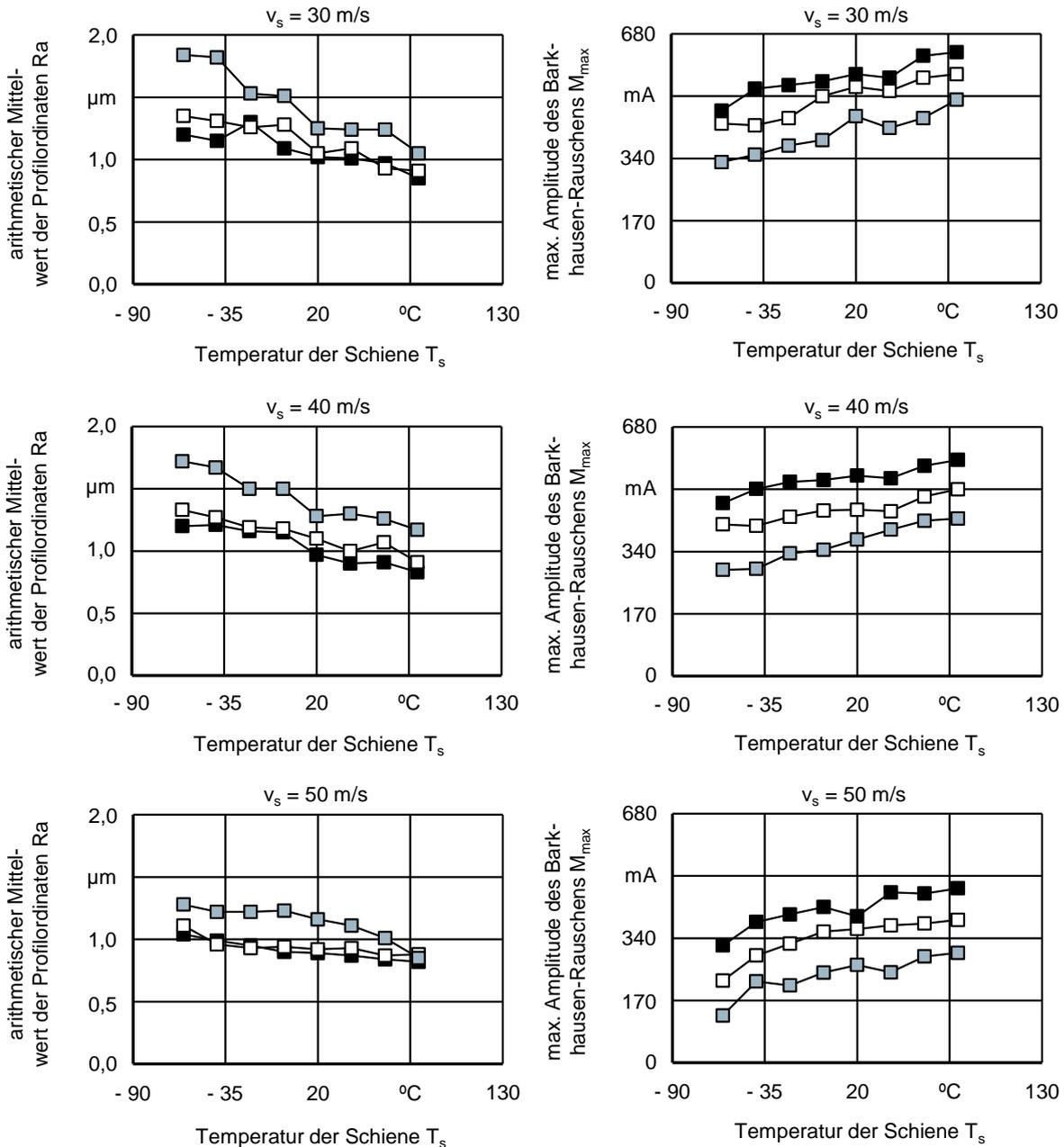
Schleifprozess
 Längs-Umfangs-Planschleifen
Schleifstellgrößen
 $v_s = 30 \text{ m/s}$
 $a_e = 0,007 \text{ mm}$
 $v_f = 22 \text{ m/min}$
 $a_p = 20 \text{ mm}$
 Gegenlauf
 Trockenbearbeitung
Maschine
 Blohm Profimat MT 408

Bild 7-2: Radialverschleiß Δr_s kunstharzgebundener Schmelzkorundschleifwerkzeuge für das Schienenschleifen

7.2 Schientemperatur

Das Wissen über die temperaturabhängige Zerspanbarkeit von feinperlitischen niedriglegierten Schienenstählen kann dem aktuellen Stand der Technik nicht entnommen werden. Dies erschwert die Auslegung von Schienenschleifprozessen bei veränderlichen Umgebungstemperaturen. Im Kapitel 6 wurde aufgezeigt, dass die Schientemperatur einen eindeutigen Einfluss auf die Spanbildungsmechanismen beim Schienenschleifen hat. Bei der Steigerung der Temperatur kommt es zu einer Verbesserung der Materialfließigenschaften und damit verbunden zu einer Steigerung der Effektivität der Spanbildung. Niedrige Werkstücktemperaturen verursachen hingegen eine duktilere, weniger vorhersagbare Spanbildung, was auf veränderte Dehnungswerte und eine geringere Kerbschlagzähigkeit zurückgeführt werden kann. Im Rahmen des aktuellen Unterkapitels besteht das Ziel, einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Schientemperaturen und den Bearbeitungsergebnissen zu ermitteln. Zum Gewinn einer breiteren Wissensbasis werden mehrere Kombinationen der Prozessstellgrößen Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s , Vorschubgeschwindigkeit v_f und Zustellung a_e bei variierenden Schientemperaturen systematisch untersucht.

In Bild 7-3 ist der Einfluss der Temperatur der Schiene T_s sowie der Prozessstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s und bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_w auf die Oberflächenqualität in Form des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinaten R_a sowie die Randzonenbeschaffenheit in Form der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} gezeigt. In Bild 12-7, Bild 12-8 und Bild 12-9 wird zudem gezeigt, wie die weiteren untersuchten Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses, die mittlere größte Höhe des Profils R_z , der Materialanteil R_{mr} (5 %; - 0,4 μm) und die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , durch die Schientemperatur T_s in Kombination mit den Prozessstellgrößen beeinflusst werden. In Bild 7-4 sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Randzonen nach dem Schleifen abgebildet sowie die Werte der entsprechenden Härtungstiefen CHD HV 0,3 mit angegeben. Zum besseren Verständnis des Prozessverhaltens sind in Bild 7-5 die korrespondierenden Prozesskennwerte bezogene Schleifkraft F'_t und kontaktflächenbezogene Schleifenergie E''_c dargestellt. Aus Bild 12-10, Bild 12-11 und Bild 12-12 können des Weiteren die Einflüsse der Schientemperatur und Prozessstellgrößen auf die bezogene Schleifnormalkraft F'_n , kontaktflächenbezogene Schleifleistung P''_c sowie spezifische Schleifenergie e_c entnommen werden.

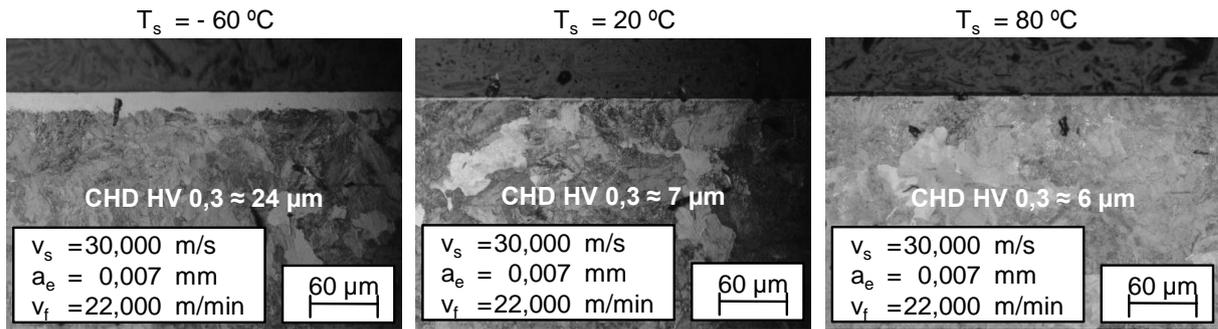


Schleifprozess
 Längs-Umfangs-Planschleifen
Schleifstellgrößen
 v_s variabel
 ■ $Q'_W = 2,57 \text{ mm}^3/\text{mms}$
 □ $Q'_W = 5,14 \text{ mm}^3/\text{mms}$
 ▣ $Q'_W = 7,71 \text{ mm}^3/\text{mms}$
 a_e variabel
 $v_f = 22,00 \text{ m/min}$
 $a_p = 20,00 \text{ mm}$
 Gegenlauf
 Trockenbearbeitung
Maschine
 Blohm Profimat MT 408

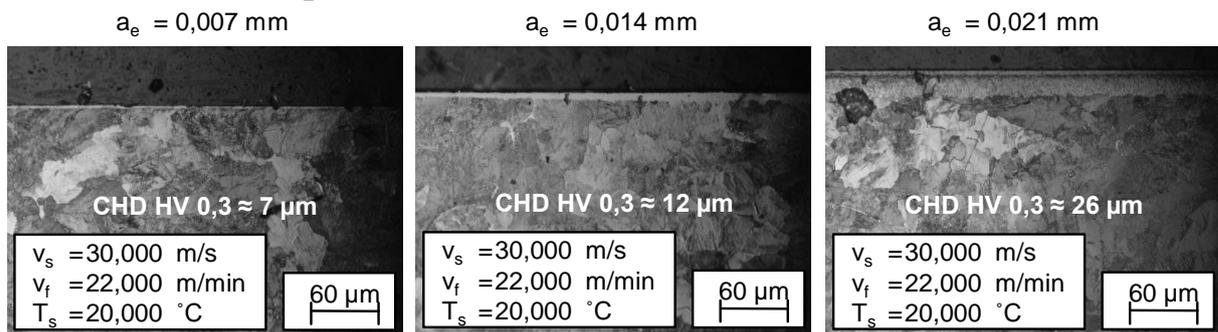
Schleifwerkzeuge
 zylindrische Schleifscheibe
 STELLA KERAMIK
 $300 \times 30 \times 127 \text{ mm}^3$
 Korngröße 20 Mesh
 100 % Schmelzkorund
 Kunstharzbindung
 Härte Q (hart)
 Struktur 4
Werkstück / Schiene
 gerade Vignolschiene S49
 VOESTALPINE AG
 Stahl R260
 $l = 140 \text{ mm}$
 T_s variabel

Bild 7-3: Einfluss variierender Schienentemperaturen und Prozessstellgrößen auf die Oberflächen- und Randzonenqualität

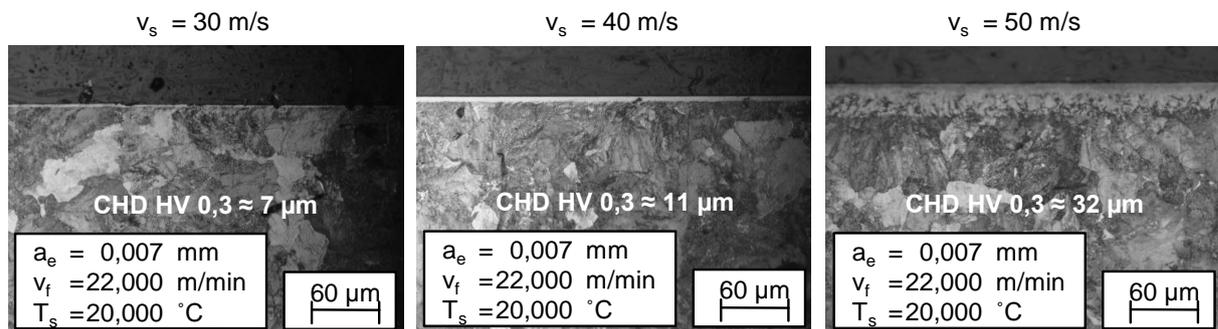
Einfluss der Temperatur der Schiene T_s



Einfluss der Zustellung a_e



Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit v_s



Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit v_f

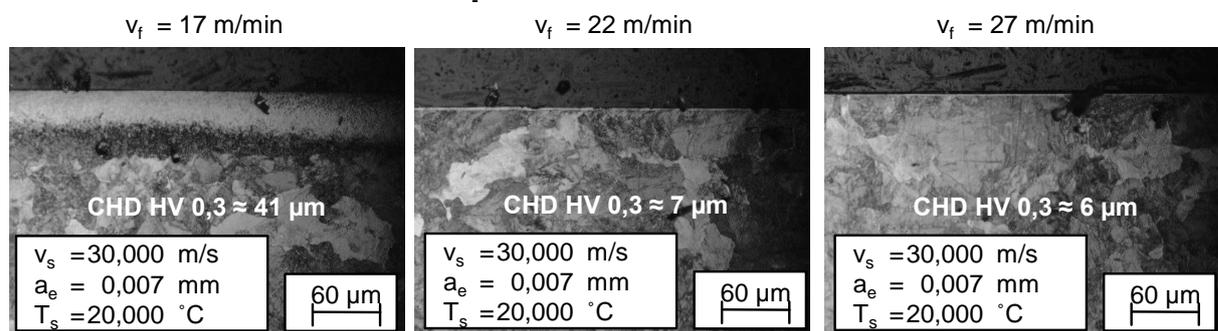
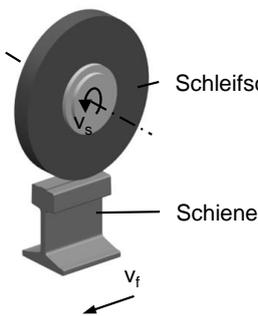
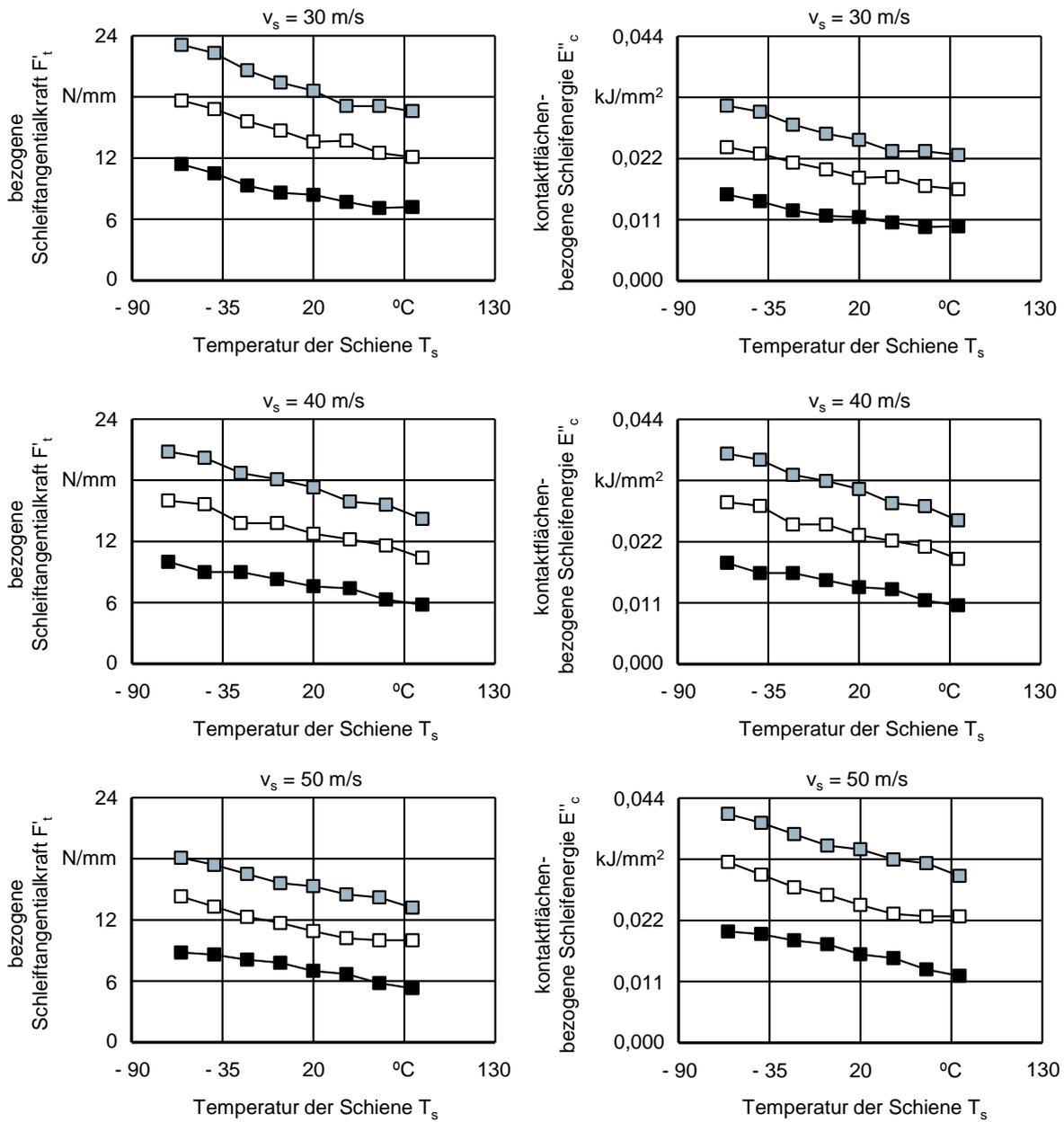


Bild 7-4: Einfluss variierender Schienentemperaturen und Prozessstellgrößen auf die Randzonenbeschaffenheit

7 Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

v_s	variabel
■ Q'_W	= 2,57 mm³/mms
□ Q'_W	= 5,14 mm³/mms
■ Q'_W	= 7,71 mm³/mms

a_e	variabel
v_f	= 22,00 m/min
a_p	= 20,00 mm

Gegenlauf
Trockenbearbeitung

Maschine
Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

zylindrische Schleifscheibe
STELLA KERAMIK
300 x 30 x 127 mm³
Korngröße 20 Mesh
100 % Schmelzkorund
Kunsthartzbindung
Härte Q (hart)
Struktur 4

Werkstück / Schiene
gerade Vignolschiene S49
VOESTALPINE AG
Stahl R260
 l = 140 mm
 T_s variabel

Bild 7-5: Einfluss variierender Schienentemperaturen und Prozessstellgrößen auf Schleifkräfte und -energien

Eine Steigerung der Temperatur der Schiene T_s verursacht verbesserte Oberflächenqualitäten, da die Ra-, Rz-Werte sinken und die Rmr (5 %; - 0,4 μm)-Werte steigen. Insbesondere bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten v_s kann eine Reduktion der Ra-Werte um etwa 40 % mit einer Steigerung der Schienentemperatur von $T_s = -60\text{ }^\circ\text{C}$ auf $T_s = 80\text{ }^\circ\text{C}$ festgestellt werden. Der Grund hierfür ist die steigende Duktilität der Spanabtrennung mit höheren Werkstücktemperaturen T_s , die zu geringeren abgetrennten Materialvolumina mit den einzelnen Körnern und damit zu den geringeren Spannungsdicken h_{cu} führt. Auch die im Rahmen der Einkornritzversuche festgestellte Reduktion der geometrischen Parameter der Schleifspuren, wie die Höhe des ersten y_1 und zweiten Aufwurfes y_2 bei einer Steigerung der Temperatur T_r , spricht für feinere Oberflächengüten und höhere Materialanteile.

Mit der Steigerung der Schienentemperatur T_s nimmt das Maß der thermischen Randzonenbeeinflussung wiederum ab, was anhand der Erhöhung der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} und der Reduktion der Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , belegt wird. Die M_{max} -Werte steigen im Bereich der untersuchten Schienentemperaturen $-60\text{ }^\circ\text{C} \leq T_s \leq 80\text{ }^\circ\text{C}$ um bis zu 25 % an. Auch auf den Querschliffbildern der Schienenrandzonen ist dieser Einfluss der Schienentemperatur T_s auf die Gefügebeschaffenheit sichtbar. Während bei der niedrigsten Temperatur der Schiene von $T_s = -60\text{ }^\circ\text{C}$ massive martensitische white etching layers (WEL) mit einer Härtungstiefe CHD HV 0,3 = 24 μm erzeugt werden, kann bei der höchsten untersuchten Schienentemperatur $T_s = 80\text{ }^\circ\text{C}$ eine relativ geringe Härtungstiefe CHD HV 0,3 = 6 μm gemessen werden. Die angegebenen Messwerte der Einhärtungstiefe beziehen sich dabei auf den Fall der konstanten Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30\text{ m/s}$, Zustellung $a_e = 0,007\text{ mm}$ und Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 22\text{ m/min}$.

Die kontaktfächenbezogene Schleifenergie E''_c liefert als einziger Prozesskennwert klare Korrelationen mit den festgestellten temperaturabhängigen thermischen Randzonenveränderungen. Mit einer Steigerung der Temperatur der Schiene T_s und konstant gehaltenen Schleifstellgrößen erfolgt eine kontinuierliche Reduktion der E''_c -Werte, was ein geringeres Maß der Randzonentransformationen verursacht. Es kann mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass beim Schienenschleifen nicht nur die Gesamtprozessleistung, sondern auch die lokale Eingriffszeit Δt einen nennenswerten Einfluss auf die Ausbildung der Randzone hat.

Die festgestellte Reduktion der Schleifkräfte sowie Leistungs- und Energiekenngrößen bei einer Erhöhung der Schienentemperatur T_s kann durch eine im Kapitel 6 identifizierte Steigerung der Duktilität der Spanbildung erklärt werden. Aufgrund der verbesserten Umformbarkeit des Materials sowie der vorhersagbaren Spanbildungsmechanismen sind bei gesteigerten Temperaturen der Schiene T_s geringere Schleifleistungen zur Spanumformung und -abtrennung nötig, wodurch die Schienenrandzone thermisch geringer beeinflusst wird.

Bei der Analyse des Einflusses des variierenden bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w mit veränderlicher Zustellung a_e auf die Oberflächen- und Randzonenkenngrößen ist festzuhalten, dass diese Stellgröße das Bearbeitungsergebnis eindeutig beeinflussen und hierzu konkrete Wirkzusammenhänge bestehen. Mit einer Steigerung der Zustellung a_e erfolgt eine Erhöhung der Rauheitskennwerte Ra und Rz sowie eine Reduktion des Materialanteils Rmr (5 %; - 0,4 μm), in Einzelfällen um bis zu 40 %. Dies ist auf die Steigerung der Spannungsdicken h_{cu} zurückzuführen. Auch der im Rahmen der Einkornritzversuche festge-

stellte Unterschied in den dominierenden Mechanismen auf die Spanbildung spielt hier vermutlich eine Rolle. Während bei der Zustellung $a_e = 0,007$ mm die Oberflächentopographie vermutlich noch stark durch das Mikropflügen beeinflusst ist, stellt bei den Zustellungen $a_e = 0,014$ mm und $a_e = 0,021$ mm eindeutig das Mikrospannen den dominierenden Spanbildungsmechanismus dar. Der Einfluss der Zustellung a_e ist insbesondere in Kombination mit der niedrigsten getesteten Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30$ m/s deutlich sichtbar.

Ferner ist zu sagen, dass die Zustellung a_e umgekehrt proportional mit dem Maß der Randzonenveränderung korreliert. Bei der Steigerung der Zustellung a_e fallen die M_{msx} -Werte ab, während die H_{co} -Werte zunehmen. Auch die Analyse des Gefüges der nach der Schleifbearbeitung zerstörten Proben bestätigt diese Aussage. Während die Zustellungen $a_e = 0,007$ mm schmale WEL und eine Einhärtung der Randzone CHD HV 0,3 = 7 μ m verursachen, bringen die höchsten untersuchten Zustellungen $a_e = 0,021$ mm die wesentlich breiteren WEL mit einer Härtungstiefe CHD HV 0,3 = 26 μ m mit sich. Diese Messwerte kommen für den Fall einer konstanten Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30$ m/s, Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 22$ m/min und Temperatur der Schiene $T_s = 20$ °C zu Stande. Dieser Einfluss ist auf die Steigerung der Spannungsdicken h_{cu} mit der Steigerung der Zustellung a_e zurückzuführen. Dies führt aufgrund der gestiegenen abzutrennenden Materialvolumina zu höheren Wärmeeinträgen in die Schiene. Mit einer Steigerung der Werkzeugzustellung a_e im Bereich $0,007 \mu\text{m} \leq a_e \leq 0,021 \mu\text{m}$ wächst des Weiteren die kontaktflächenbezogene Schleifenergie E''_c um bis zu 220 %, was ausschlaggebend für das festgestellte signifikante Maß der Veränderung der erzielten Randzonen ist.

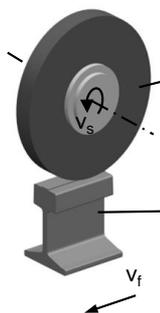
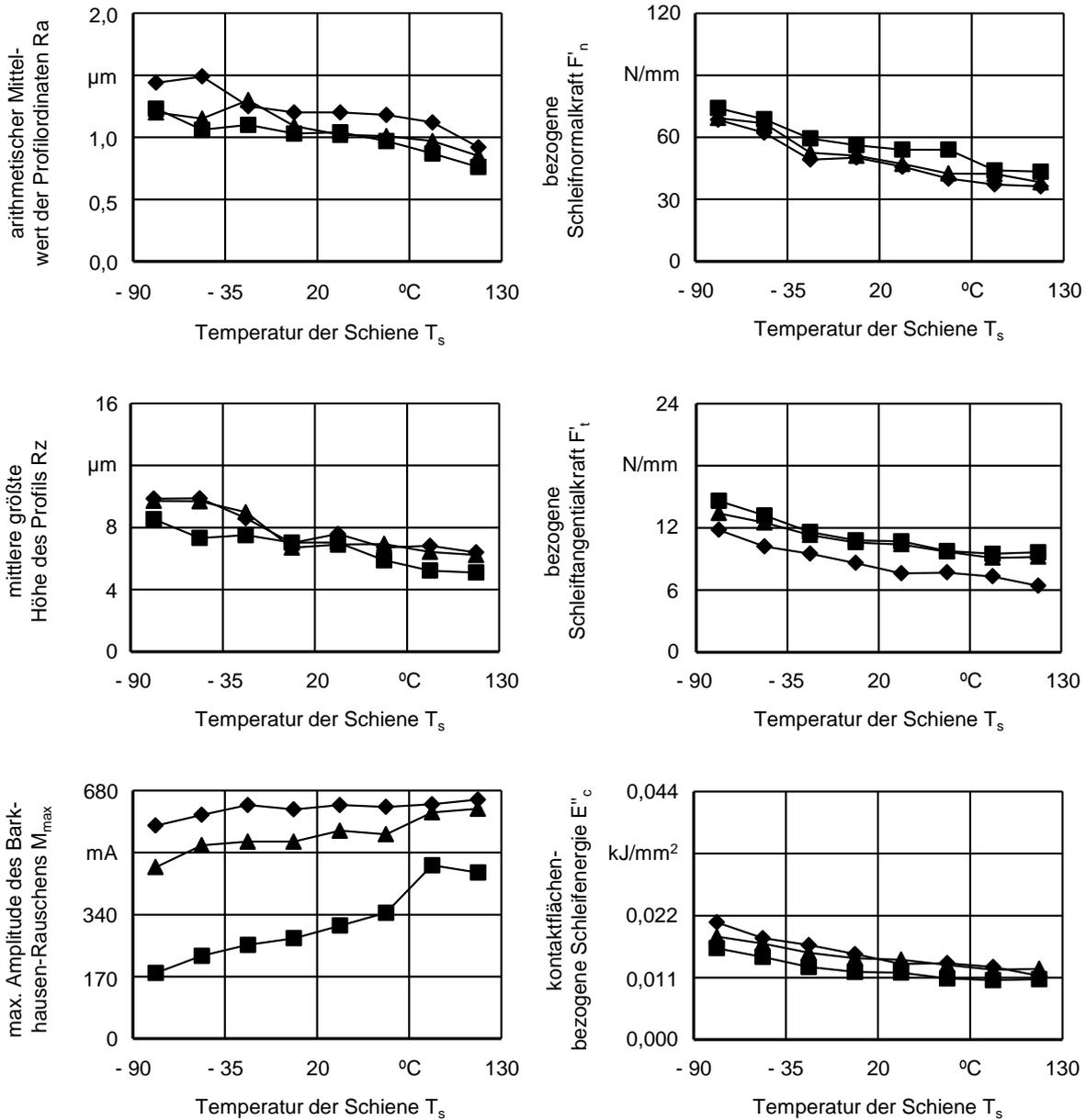
Aus der Betrachtung des Einflusses der Umfangsgeschwindigkeit v_s auf die Randzonenkennwerte geht hervor, dass mit einer Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit v_s grundsätzlich verbesserte Oberflächenkennwerte R_a , R_z und R_{mr} (5 %; - 0,4 μ m) generiert werden. Insbesondere bei hohen Schienentemperaturen $T_s \geq 20$ °C in Kombination mit einer relativ geringen Zustellung von $a_e = 0,007$ mm liegen die Werte des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinaten bei $R_a = 0,8 - 1,0$ μ m, was sehr feinen Oberflächen entspricht und die derzeitige Industrieanforderung $R_a \leq 10$ μ m um den Faktor 10 übertrifft. Dieser Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit v_s auf die Oberflächenkennwerte steht im direkten Zusammenhang mit der dadurch erzielten Reduktion der Einzelspannungsdicke h_{cu} .

Gleichzeitig nimmt jedoch mit der Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit v_s das Maß der thermischen Randzonenbeeinflussung auf die Schienenrandzone systematisch zu, was anhand der Reduktion der Werte der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} -Werte sowie der Steigerung der Werte der Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} belegt ist. Auch auf den exemplarisch durchgeführten Randzonenanalysen an den Schienenquerschliffen spiegelt diese Tatsache wider. Bei der Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit von $v_s = 30$ m/s auf $v_s = 50$ m/s ändert sich die Tiefe der erzeugten WEL eindeutig und bringt eine Steigerung der Härtungstiefe von Δ CHD HV 0,3 = 25 μ m mit sich. Das festgestellte Phänomen der größeren Randzonenveränderung bei der Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit v_s wird ebenfalls durch die Erhöhung der generierten kontaktflächenbezogene Schleifenergien E''_c verursacht. Die Intensität der Einzelschneidenkontakte pro Zeiteinheit steigt dabei proportional zu der Umfangsgeschwindigkeit v_s an, was aufgrund der begrenzten werkstückseitigen Wärmeleitfähigkeit zu höheren Wärmeeinträgen in die Schiene führt. Zu beachten ist dabei, dass die festgestellte Steigerung der kontaktflächenbe-

zogenen Schleifenergien E''_c mit einer Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit v_s gleichzeitig mit einer Reduktion der bezogenen Schleiftangentialkraft F'_t auftritt, die zusammen mit dem Kennwert der Schleifkontaktzeit Δt zur Berechnung der kontaktflächenbezogenen Schleifenergie E''_c herangezogen wird. Dies führt zu dem Fazit, dass im untersuchten Bereich der Schleifstellgrößen und Temperaturen der Schiene T_s der Einfluss der Schleifkontaktzeit Δt diesen der bezogenen Schleiftangentialkraft F'_t überlagert.

Zusätzlich zur vollfaktoriellen Untersuchung des Einflusses der Schleifstellgrößen Zustellung a_e und Umfangsgeschwindigkeit v_s in Kombination mit variablen Schienentemperaturen T_s wurde der Einfluss des variierenden bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w mit veränderlichen Vorschubgeschwindigkeit v_f bei der gleich bleibenden Zustellung $a_e = 0,007$ mm und Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30$ m/s systematisch untersucht. In Bild 7-6 ist der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit v_f in Kombination mit der Temperatur der Schiene T_s auf die Oberflächenkennwerte arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten R_a , mittlere größte Höhe des Profils R_z , den Randzonenzustand in Form der maximalen Amplitude des Barkhausen-Raushens M_{max} sowie die wesentlichen Prozesskennwerte Schleifnormal- F'_n , Tangentialkraft F'_t und kontaktflächenbezogene Schleifenergie E''_c dargestellt. Zusätzlich kann der Einfluss des variierenden bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w mit veränderlichen Vorschubgeschwindigkeit v_f unter variablen Schienentemperaturen T_s auf den Materialanteil R_{mr} (5 %; - 0,4 μm), die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} sowie die kontaktflächenbezogene Schleifleistung P''_c und spezifische Schleifenergie dem Bild 12-13 entnommen werden.

Bei allen getesteten Vorschubgeschwindigkeiten v_f sind die zuvor identifizierten Einflüsse der Temperatur der Schiene T_s sichtbar. Mit einer Steigerung der Temperatur der Schiene T_s erfolgt eine Reduktion der Rauheitskennwerte R_a und R_z sowie die Steigerung des Materialanteils R_{mr} (5 %; - 0,4 μm), verbunden mit der Reduktion der thermischen Einwirkung auf die Randzone. Unabhängig von der Temperatur der Schiene T_s kann festgehalten werden, dass mit der Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit v_f eine Erhöhung des arithmetischen Mittelwertes von Profilordinaten R_a und der mittleren größten Höhe des Profils R_z sowie eine Reduktion des Materialanteils R_{mr} (5 %; - 0,4 μm) stattfinden. Dies ist auf die Erhöhung der Einzelspannungsdicken h_{cu} zurückzuführen. Dabei liegen die aufgezählten Kennwerte stets in einem relativ feinen Bereich von $R_a = 0,8 - 1,6$ μm .



Schleifprozess
 Längs-Umfangs-Planschleifen
Schleifstellgrößen
 $v_s = 30,000$ m/s
 $\blacksquare Q'_w = 1,980$ mm³/mms
 $\blacktriangle Q'_w = 2,570$ mm³/mms
 $\blacklozenge Q'_w = 3,160$ mm³/mms
 $a_e = 0,007$ mm
 v_f variabel
 $a_p = 20,000$ mm
 Gegenlauf
 Trockenbearbeitung
Maschine
 Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge
 zylindrische Schleifscheibe
 STELLA KERAMIK
 300 x 30 x 127 mm³
 Korngröße 20 Mesh
 100 % Schmelzkorund
 Kunstharzbindung
 Härte Q (hart)
 Struktur 4
Werkstück / Schiene
 gerade Vignolschiene S49
 VOESTALPINE AG
 Stahl R260
 $l = 140$ mm
 T_s variabel

Bild 7-6: Einfluss variierender Schienentemperaturen und bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_w mit veränderlichen Vorschubgeschwindigkeiten v_f auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte

Bei der Analyse des Einflusses des variierenden bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w mit veränderlicher Vorschubgeschwindigkeit v_f auf das Maß der thermischen Randzonenveränderung von Schienen kann festgestellt werden, dass mit den steigenden v_f -Werten die Werte der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} rasant abnehmen und die Werte der Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} zunehmen. Das weist auf eine Verringerung der thermischen Randzonenbeeinflussung mit steigender Vorschubgeschwindigkeit v_f hin. Bei der geringsten untersuchten Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 17$ m/min wurden stets die mit Abstand größte Randzonenveränderungen festgestellt, in welchen die Härtungstiefen von etwa CHD HV 0,3 = 41 μ m gemessen wurden. Gleichzeitig verursachten die gesteigerten Werte der Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 27$ m/min eine Reduktion der Härtungstiefe um Δ CHD HV 0,3 = 35 μ m. Erklärt werden kann dieser Zusammenhang durch eine Steigerung der Schleifkontaktzeiten Δt bei einer Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit v_f , was in Kombination mit der Trockenbearbeitung zu einer signifikanten Steigerung der Energie- und Wärmeentwicklung im Schleifprozess führt. Wie schon zuvor festgestellt, korrelieren die erzeugten variablen Maße der thermischen Randzonenveränderung mit den entsprechenden Werten der kontaktfächenbezogenen Schleifenergien E''_c . Bei der geringsten Vorschubgeschwindigkeit v_f ist eine massive thermische Veränderung des Randzonenzustandes schon anhand von blauen Anlauffarben eindeutig feststellbar.

Zusammenfassend wird anhand der durchgeführten technologischen Untersuchungen aufgezeigt, dass das Schienenschleifen ein thermisch kritisches Bearbeitungsverfahren ist. Aufgrund der hohen bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_w in Kombination mit der Trockenbearbeitung verändern sich das Randzonengefüge und die mechanischen Werkstoffeigenschaften durch das Schienenschleifen deutlich. Das Maß der thermischen Veränderung kann jedoch durch die identifizierten Zusammenhänge zwischen der Schientemperatur und den Prozessstellgrößen Zustellung a_e , Umfangsgeschwindigkeit v_s sowie Vorschubgeschwindigkeit v_f signifikant beeinflusst bzw. bezogen auf das Wissen über das tribologische Einsatzverhalten der Randzonen genau eingestellt werden. Für die hochproduktive Schleifbearbeitung der relativ weichen ungehärteten Schienenstähle (HRC \approx 26 - 30) wurde die Erkenntnis gewonnen, dass dabei ausschließlich zur Ausbildung von Neuhärtungszonen kommt, während beim trockenen Schleifen mit hohen Zeitspannungsvolumina der härteren Stahlwerkstoffe, wie des Wälzlagerstahls 100Cr6 oder Einsatzstahls 16MnCr5 (beide HRC \approx 60 im gehärteten Zustand), es tendenziell zur Generierung der Anlass- und Neuhärtungszonen kommt.

Die Steigerung der Temperatur der Schiene T_s führt konkret zur Verbesserung der Oberflächenkennrößen und auch zur Reduktion des thermischen Einflusses auf die Schienenrandzone. Dies ist zum einen durch zunehmend günstigere elasto-plastischen Werkstoffeigenschaften zu erklären, die eine einfachere Spanabtrennung verursachen. Zum anderen liegt die Vermutung nahe, dass durch das Schienenschleifen sehr hohe lokale Prozesstemperaturen generiert werden, die die Austenitisierungstemperaturen überschreiten. BRUNNER [BRU99] zeigte auf, dass bei der Schleifbearbeitung des Stahls 100Cr6 mit konventionellen Schleifwerkzeugen schon bei bezogenen Zeitspannungsvolumina von $Q'_w = 1,5$ mm³/mms die lokalen Kontaktzonentemperaturen von $T_p \approx 900$ °C möglich sind. Bei der nachfolgenden Abkühlung der Schiene bei Raumtemperatur beschleunigen die niedrigen Ausgangstemperaturen der Schiene T_s vermutlich die lokalen Abkühlgeschwindigkeiten. Hierdurch kann ein höherer Anteil des Austenites in Martensit umgewandelt und hierdurch eine höhere Einhärtung erzielt werden.

Von den ausgewählten Schleifstellgrößen haben für die untersuchten Stellgrößenbereiche sowohl die Zustellung a_e als auch die Umfangs- v_s und Vorschubgeschwindigkeit v_f einen nennenswerten Einfluss auf die Oberflächen- und Randzonenbeschaffenheit. Die Steigerung der Zustellung a_e führt zur Verschlechterung der Oberflächenkennwerte sowie einem höheren thermischen Einfluss auf das Schienengefüge. Die Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit v_s bringt feinere Oberflächenbeschaffenheiten, jedoch auch höhere Wärmeeinträge in die Randzone, mit sich. Für die Vorschubgeschwindigkeit v_f gilt: Zu langsam ist gut für die Oberflächenqualität, jedoch kritisch für die Randzone. Während im Fall der Zustellung a_e die Energie für die Spanabtrennung den primären Einflussfaktor auf die Energieentwicklung und Randzoneneinwirkung darstellt, ist es für den Fall der Vorschubgeschwindigkeit v_f die Kontaktzeit Δt , und im Fall der Umfangsgeschwindigkeit v_s die zeitspezifische aktive Schneidenzahl, die die Bearbeitungsergebnisse beeinflussen. Mit der kontaktfächenbezogenen Schleifenergie E''_c ergibt sich eine Kenngröße zur Abschätzung der durch den Schienenschleifprozess in die Schiene eingebrachten thermischen Veränderung. Zur späteren Auslegung schädigungsarmer Schienenschleifprozesse empfiehlt sich, diese Kenngröße als Indikator zur Abschätzung des Maßes der Randzonenschädigung zu verwenden. Dabei soll für die kontaktfächenbezogene Energie E''_c eine Grenze definiert werden, die einem kritischen, nicht zu überschreitendem Maß der thermischen Randzonenveränderung entspricht. Die endgültige Bewertung untersuchter Schienenschleifprozesse in Kombination mit der Temperaturen der Schiene erfolgt im Rahmen der tribologischen Untersuchungen im Kapitel 8.

Deskriptives Prozessmodell des Schienenschleifens unter Berücksichtigung der Schienentemperatur

Wie schon in den Kapiteln 5 und 6 wird das durch die Schleifversuche erlangte empirische Wissen bezüglich der Zusammenhänge zwischen den Schleifstellgrößen und Schienentemperaturen mit den Prozesskennwerten und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses in Form eines deskriptives Prozessmodells zusammengefasst. Die Modellerarbeitung dient einer besseren Vorhersage der temperaturabhängigen Spanbildungsmechanismen sowie einem besseren Verständnis über die technologischen Zusammenhänge zwischen den Systemeingangs- und Zielgrößen. Die Zielgrößen des Modells sind die Schleifkennwerte und die Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses, wovon insgesamt sieben zur Modellbildung herangezogen werden: der arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten R_a , der Materialanteil R_{mr} (5 %; - 0,4 mm), die maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} , die bezogene Schleifnormalkraft F'_n , die bezogene Schleiftangentialkraft F'_t , die kontaktfächenbezogene Schleifenergie E''_c sowie die spezifische Schleifenergie e_c . Die in Formel 4-1 gezeigte Gleichung wird für den vorliegenden Fall der drei Eingangsgrößen Schienentemperatur T_s , Umfangsgeschwindigkeit v_s und Zustellung a_e angepasst, Formel 7-1.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_4 \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_5 \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_6 \cdot x_2 \cdot x_3 + \beta_7 \cdot x_1^2 + \beta_8 \cdot x_2^2 + \beta_9 \cdot x_3^2 \quad (7-1)$$

Die berechneten Koeffizienten für die Modellgleichungen für die Zielgrößen Y_i sind in Tabelle 7-1 angegeben. Wie schon im Fall der Modellentwicklung für die Einkornritzversuche soll hierbei beachtet werden, dass die aufgezählten Koeffizienten den nicht kodierten Eingangsgrößen entsprechen. Der Versuchsplan stellt weiterhin keinen reinen 3^k -Versuchsplan dar, da bei der Eingangsgröße Schienentemperatur T_s acht Stufen zur Modellerstellung herangezogen werden.

Tabelle 7-1: Koeffizienten für das Regressionsmodell zur Vorhersage der Prozesskennwerte und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen

Koeffizient β_i	Ra	Rmr (5 %; - 0,4 μm)	M_{max}	F'_n	F'_t	E''_c	e_c
β_1	$6,80 \cdot 10^{-2}$	0,76	$2,51 \cdot 10^{-2}$	0,78	$2,88 \cdot 10^{-2}$	$7,23 \cdot 10^{-4}$	4,63
β_2	- 11,11	- 88,6	- 2,14	$3,91 \cdot 10^3$	$1,24 \cdot 10^3$	0,96	- $3,78 \cdot 10^3$
β_3	- $5,37 \cdot 10^{-3}$	- $2,25 \cdot 10^{-2}$	$9,63 \cdot 10^{-4}$	- 0,35	- $4,17 \cdot 10^{-2}$	- $1,16 \cdot 10^{-5}$	- 0,37
β_4	- 0,50	- 1,34	- 0,10	- 15,20	- 7,99	$1,62 \cdot 10^{-2}$	46,40
β_5	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	- $3,31 \cdot 10^{-6}$	$3,97 \cdot 10^{-3}$	$4,71 \cdot 10^{-4}$	- $7,50 \cdot 10^{-7}$	- $4,20 \cdot 10^{-3}$
β_6	- 0,13	- 0,13	$1,35 \cdot 10^{-2}$	- 6,67	- 1,06	- $1,80 \cdot 10^{-3}$	15,70
β_7	- $9,15 \cdot 10^{-4}$	- $7,08 \cdot 10^{-3}$	- $3,94 \cdot 10^{-4}$	- $1,67 \cdot 10^{-2}$	- $7,40 \cdot 10^{-4}$	- $7,60 \cdot 10^{-6}$	- $2,99 \cdot 10^{-2}$
β_8	$1,97 \cdot 10^3$	- $1,96 \cdot 10^3$	- $2,11 \cdot 10^2$	- $4,18 \cdot 10^4$	- $8,06 \cdot 10^3$	- 13,50	$1,11 \cdot 10^5$
β_9	- $8,10 \cdot 10^{-4}$	- $3,90 \cdot 10^{-5}$	- $2,68 \cdot 10^{-6}$	- $1,42 \cdot 10^{-3}$	$7,16 \cdot 10^{-5}$	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$4,13 \cdot 10^{-4}$
β_0	- $4,23 \cdot 10^{-2}$	- 6,06	0,21	20,10	2,19	- $1,23 \cdot 10^{-2}$	24,70
R^2	93,7 %	94,80 %	97,50 %	97,90 %	89,50 %	89,50 %	88,20 %

In Bild 7-7 sind die Conturplots der Modellzielgrößen arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten Ra, mittlere größte Höhe des Profils Rz, Materialanteil Rmr (5 %; - 0,4 mm), maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} , bezogene Schleiftangentialkraft F'_t und kontaktflächenbezogene Schleifenergie E''_c in Abhängigkeit der Schienentemperatur T_s und der Zustellung a_e bei gleich bleibender Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30$ m/s dargestellt. In Bild 7-8 und Bild 7-9 sind des Weiteren die Conturplots der genannten Zielgrößen bei den Umfangsgeschwindigkeiten $v_s = 40$ m/s und $v_s = 50$ m/s gezeigt. In Bild 12-14, Bild 12-15 und Bild 12-16 sind die Regressionen für die weiteren Modellzielgrößen Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , bezogene Schleifnormalkraft F'_n , kontaktflächenbezogene Schleifleistung P''_c sowie die spezifische Schleifenergie e_c dargelegt. Aus den Graphen werden die zuvor identifizierten Einflüsse der Schienentemperatur T_s und Zustellung a_e auf die Schleifkennwerte und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses deutlich.

Die Verifikation der Modellierungsergebnisse erfolgt durch den Abgleich modellierter Ergebnisse mit den Ergebnissen aus den drei zusätzlichen Analogieversuchen. In Bild 7-10 ist der Kurvenverlauf der Regression als ein Ein-Faktor-Modell für die wesentlichen Zielgrößen arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten Ra und kontaktflächenbezogene Schleifenergie E''_c gezeigt. Dabei ist die Temperatur der Schiene variabel, während die Zustellung $a_e = 0,007$ mm und Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30$ m/s konstant gehalten werden. Durch die Analyse des Verhältnisses der Verifikationspunkte zu dem Verlauf der modellierten Daten kann der Schluss über eine gute Genauigkeit des hier vorgestellten Modells gezogen werden.

7 Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen

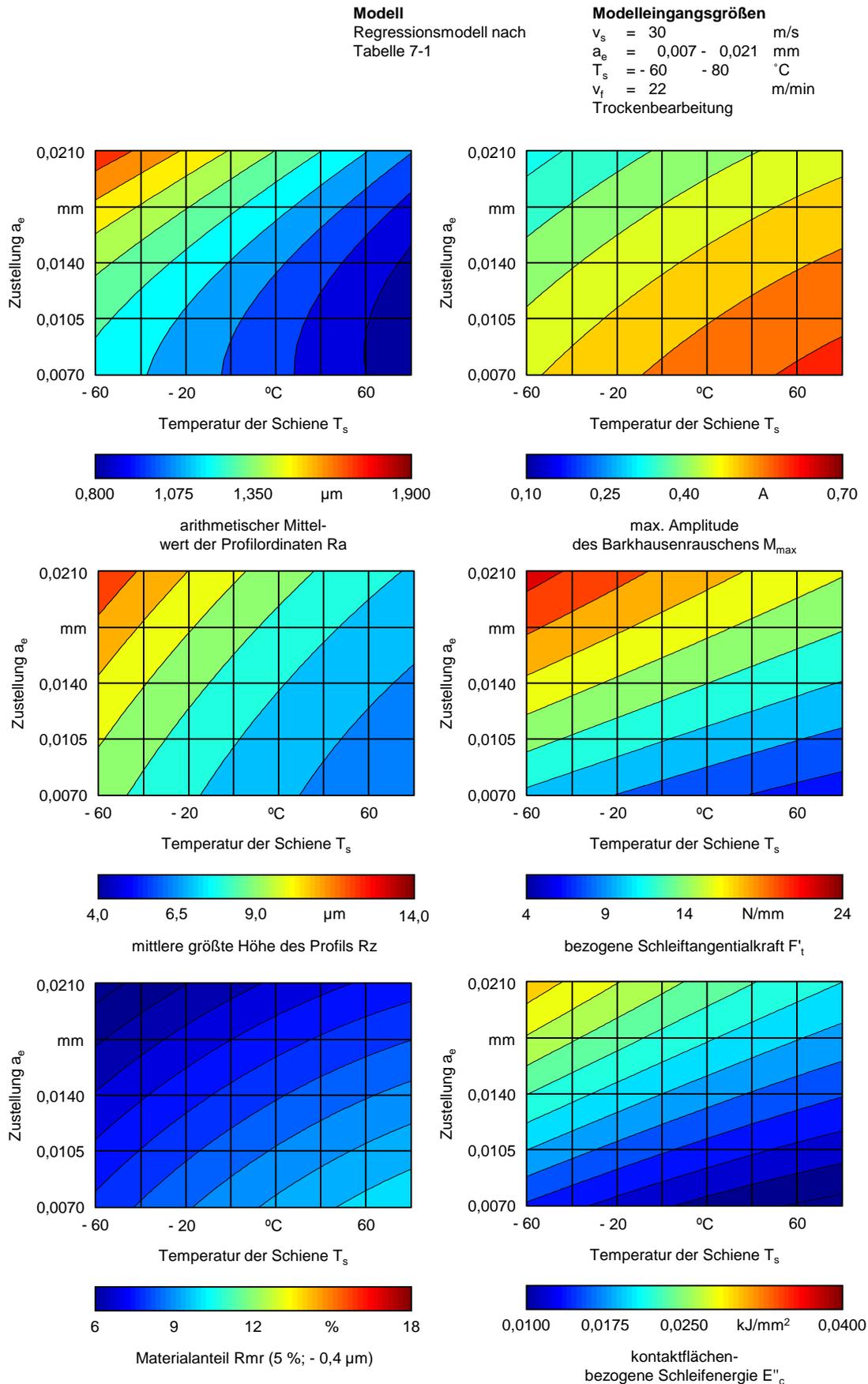


Bild 7-7: Conturplots der relevanten Zielgrößen des Regressionsmodells zur Vorhersage der Prozesskennwerte und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen für die konstante Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30$ m/s

Modell
Regressionsmodell nach
Tabelle 7-1

Modelleingangsgrößen
 $v_s = 40$ m/s
 $a_e = 0,007 - 0,021$ mm
 $T_s = -60 - 80$ °C
 $v_f = 22$ m/min
Trockenbearbeitung

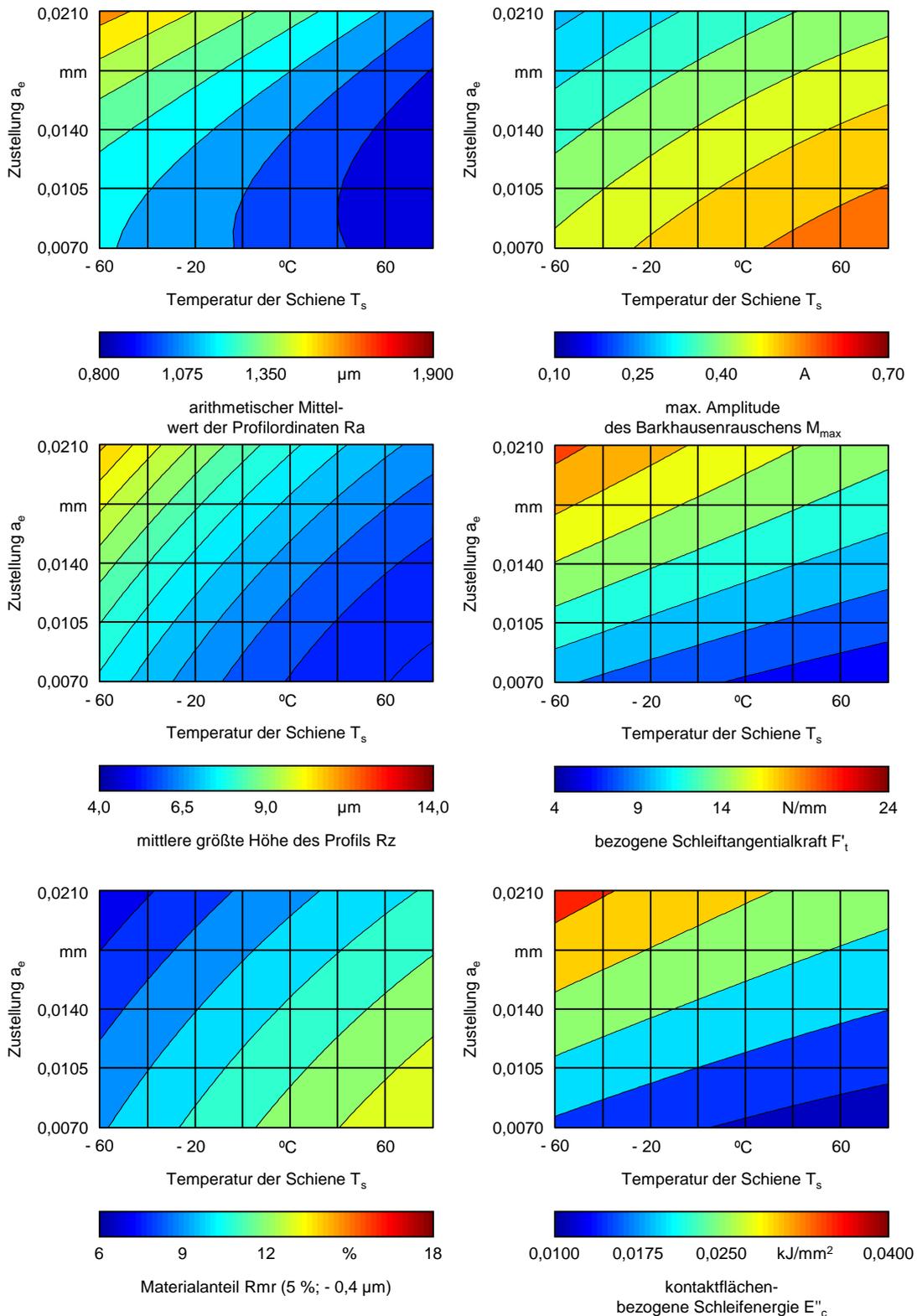


Bild 7-8: Conturplots der relevanten Zielgrößen des Regressionsmodells zur Vorhersage der Prozesskennwerte und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen für die konstante Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 40$ m/s

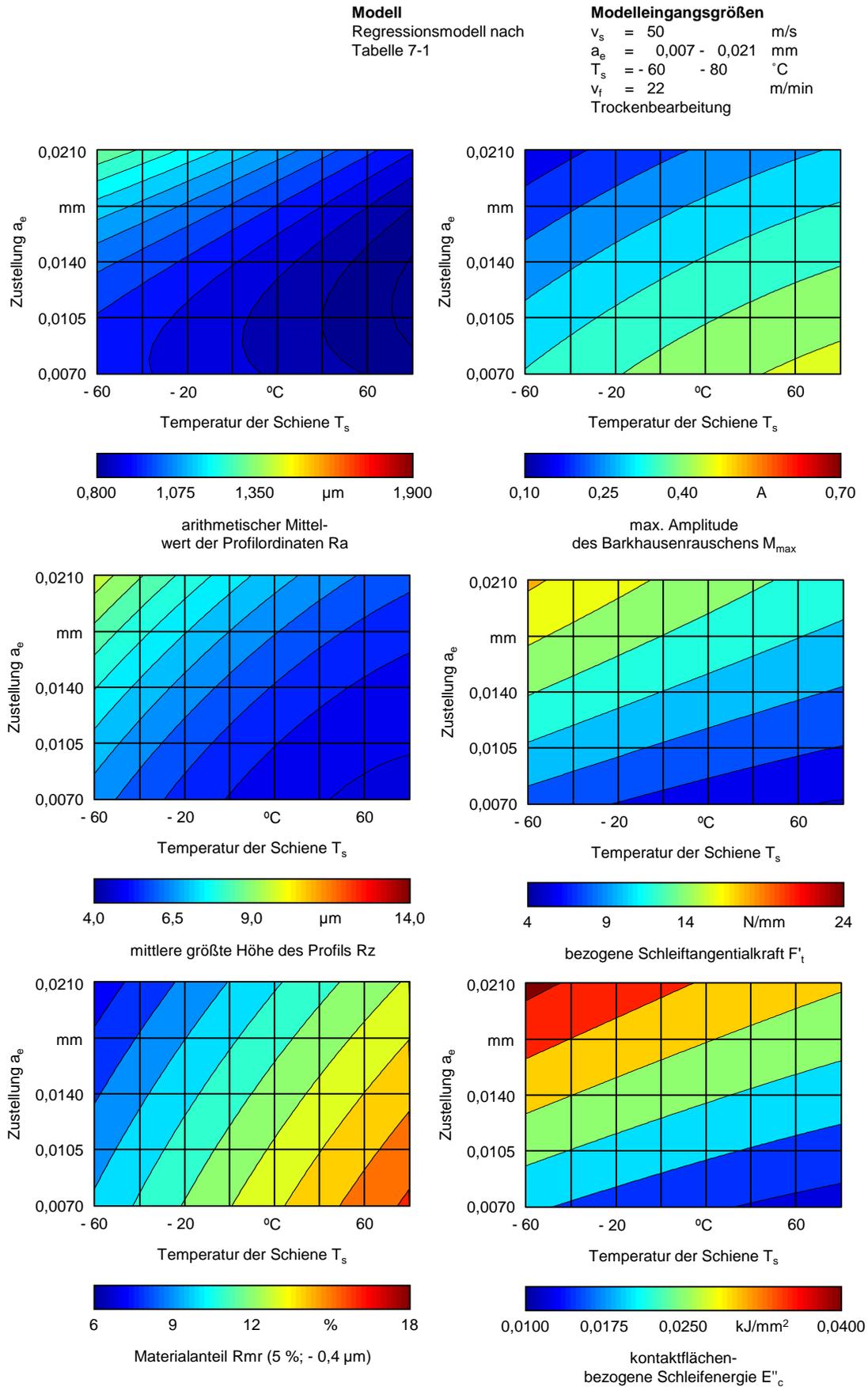


Bild 7-9: Conturplots der relevanten Zielgrößen des Regressionsmodells zur Vorhersage der Prozesskennwerte und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen für die konstante Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 50$ m/s

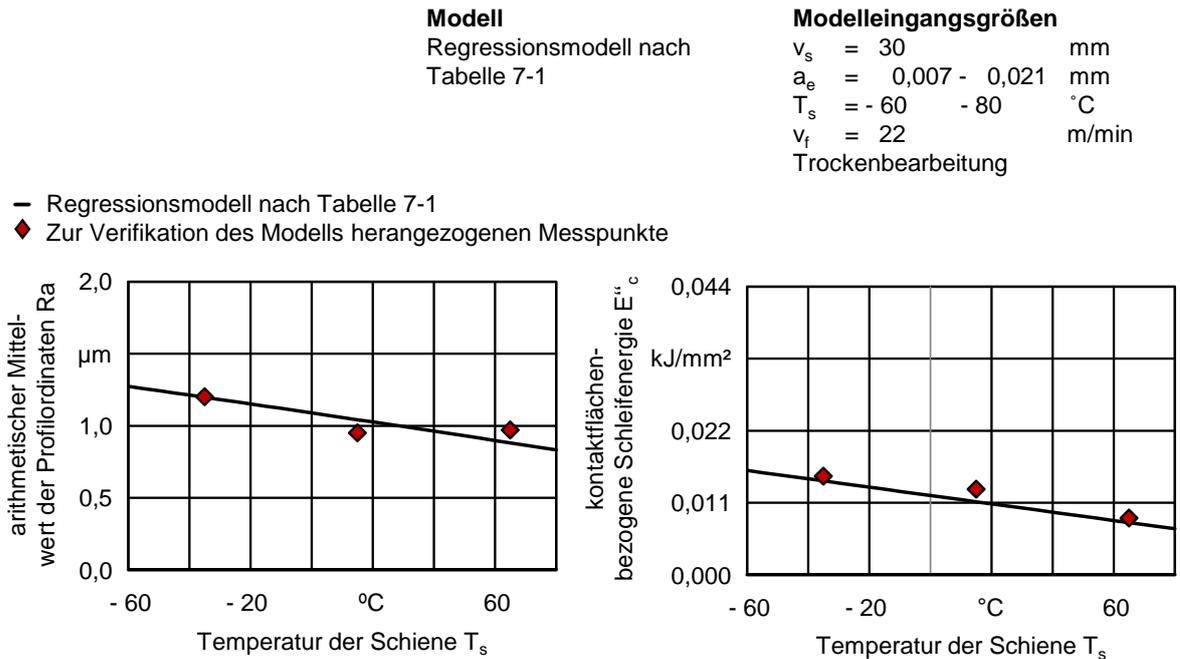


Bild 7-10: Experimentelle Verifikation des Regressionsmodells zur Vorhersage der Prozesskennwerte und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen

7.3 Schmiermengen

Die Schmierung wird in der Schleiftechnik zum einen zur Reduktion der Reibung zwischen dem Werkstück und Werkzeug und zum anderen zur Abfuhr der Wärme aus der Kontaktzone eingesetzt. Dadurch können diverse positive Effekte, wie die Reduktion des Werkzeugverschleißes, die Verbesserung der Oberflächenqualität sowie die Reduktion der thermischen Randzonenbeeinflussung, erzielt werden. Ein nicht unerheblicher Teil der Prozesswärme kann durch die Kühlschmierung abgeführt werden. Zur Schleifbearbeitung von Stahlwerkstoffen unter Verwendung konventioneller Schleifwerkzeuge werden Volumenströme bzw. Schmiermengen bis $Q_{KSS} = 300$ l/min realisiert. Die zur Schmierung eingesetzten Kühlschmierstoffe bzw. Schmieröle stellen jedoch einen relevanten Kosten- und Entsorgungsfaktor dar und sind des Weiteren mit der Applikation komplexer Kühlschmierstoffkreisläufe in den Schleifmaschinen verbunden. Aus diesem Grund wird insbesondere bei mobilen bzw. adaptiven Schleifprozessen oft auf den Einsatz der Prozessschmierung verzichtet. Dies führt nicht selten zu einer nur begrenzten Erfüllung der Anwenderanforderungen bezüglich der Bearbeitungsergebnisse, da die Endqualitäten der Bearbeitung nicht erfüllt werden. Wie im Stand der Technik berichtet, gewinnen die auf der Minimalmengenschmierung (MMS) basierenden Schmierstrategien immer mehr an Bedeutung. Diese erlauben zum einen eine vereinfachte Realisierung und geringere Schmierkosten und es können damit zum anderen nennenswerte Verbesserungen der Bearbeitungsqualität, konkret die Reduktion der Rauheitswerten und Verminderung der Randzonenschädigung, erzielt werden.

Das Schienenschleifen wird meistens als Trockenbearbeitung ohne Verwendung einer Schmierung durchgeführt. Eine hochproduktive Trockenbearbeitung in Kombination mit hohen bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_w führt zu hohen Energien für die Spanabtrennung,

die sich in Wärme umwandeln und die Schienenrandzone stark in Form einer Ausbildung von WEL mit martensitischer Basis beeinflussen. In den industriell eingesetzten Schleiftechniken bzw. -zügen zum Schienenschleifen scheint eine Integration hochkomplexer Schmier-systeme mit immensem Aufwand verbunden zu sein. Die dazu anfallenden Kosten für die Beschaffung und Entsorgung der Schmierstoffe würden die Wirtschaftlichkeitsrahmen der vielen Reparaturdienstleister vermutlich sprengen. Allerdings bieten die genannten Maschinentechniken und -züge tendenziell ausreichend Raum und Potenzial, um einfache Kühlschmierstoffbehälter einzubauen. Damit können MMS- bzw. auch alternative Schmierstrategien unter Verwendung begrenzter Schmierstoffvolumina realisiert werden. Im Kapitel 7.1 wurde gezeigt, dass die Schienentemperatur T_s als externer Einflussfaktor im signifikanten Maße die Bearbeitungsergebnisse beeinflusst. Niederschlag stellt einen weiteren relevanten externen Einflussfaktor auf die Ergebnisse der Schienenschleifbearbeitung dar. Dieser soll im aktuellen Kapitel durch die Verwendung der sogenannten Kühlschmierstoffbenetzung der Schleifscheibe und Schiene im Schleifprozess nachgebildet und hinsichtlich des Einflusses auf die Oberflächen- und Randzonenqualität analysiert werden.

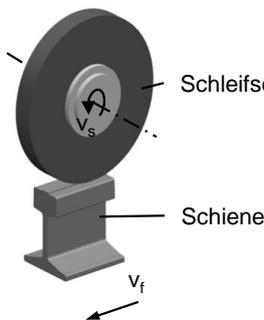
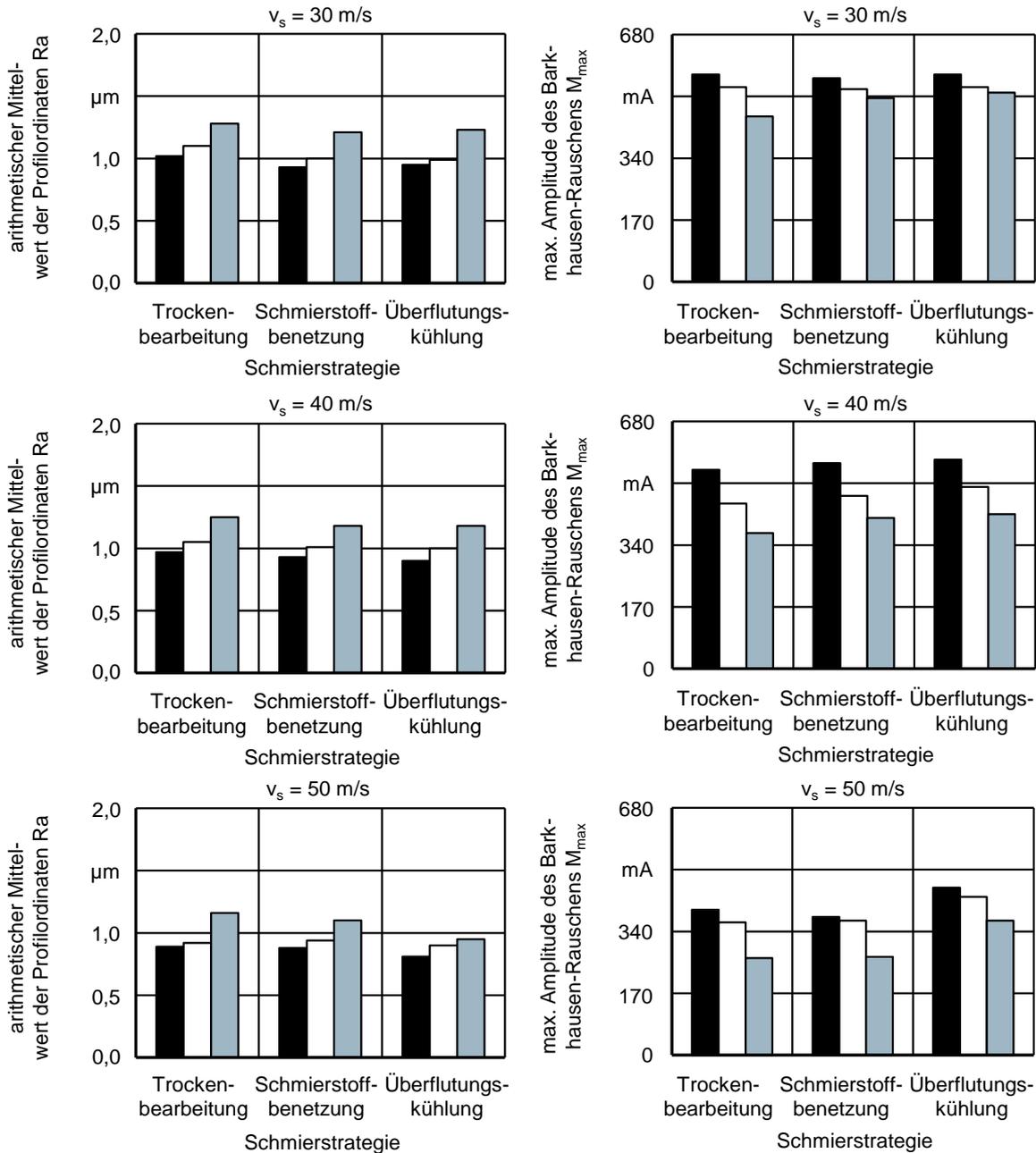
Im Rahmen des aktuellen Kapitels besteht daher das Ziel, zum einen den Einfluss einer vereinfachten Schmierstrategie unter Verwendung der begrenzten Kühlschmierstoffmengen ($Q_{KSS \max.} = 1 \text{ l/min}$) auf die Bearbeitungsergebnisse zu analysieren. Als Referenz dazu dienen zwei weitere Schmier-szenarien: die für das Schienenschleifen übliche Trockenbearbeitung sowie die Bearbeitung mit einer Überflutungskühlung. Bei technologischen Untersuchungen werden zwecks Vergleichbarkeit die gleichen Bereiche der Schleifstellgrößen bezogenes Zeitspannungsvolumens Q'_w mit veränderlicher Zustellung a_e von $a_e = 0,007 \text{ mm}$, $0,0014 \text{ mm}$ und $0,021 \text{ mm}$ sowie Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30 \text{ m/s}$, 40 m/s und 50 m/s analysiert. Diese werden zusammen mit den drei Schmier-szenarien bei konstant bleibenden restlichen Prozess- und Werkzeugstellgrößen sowie Schienentemperaturen variiert. Anschließend erfolgt in Stichversuchen die Variation des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w mit veränderlicher Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 17 \text{ m/min}$, 22 m/min und 27 m/min verbunden mit systematischem Wechsel der Schmierstrategie. Die Temperatur der Schiene bleibt während dieser Versuchsreihe konstant bei $T_s = 20 \text{ °C}$.

In Bild 7-11 ist der Einfluss der Schmierstrategie sowie der Schleifstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s und bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_w mit veränderlicher Zustellung a_e auf die Oberflächenkenngröße arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten R_a sowie die Randzonenbeschaffenheit in Form der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} dargestellt. Der Einfluss der genannten Schleifstellgrößen in Kombination mit den Schmierstrategien auf weitere Oberflächenkennwerte, die mittlere größte Höhe des Profils R_z , Bild 12-16, sowie den Materialanteil R_{mr} (5 %; $-0,4 \mu\text{m}$), Bild 12-17, sowie den die Randzonenbeschaffenheit beschreibenden Parameter Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , Bild 12-18, befinden sich im Anhang der Arbeit. In Bild 7-12 sind die exemplarischen lichtmikroskopischen Aufnahmen der Randzonen mit den entsprechenden Werten der Härtungstiefen CHD HV 0,3 gezeigt. Zum Verständnis der Prozessinteraktionen zeigt Bild 7-13 die mit den variierenden Schleifstellgrößen und Schmier-szenarien korrespondierenden Werte der bezogenen Schleiftangentialkraft F'_t und kontaktfächenbezogenen Schleifenergie E''_c . Dem Anhang der Arbeit kann des Weiteren entnommen werden, wie die bezogenen Schleifnormalkräfte F'_n , Bild 12-19, kontaktfächenbezogene Schleifleistung P''_c , Bild 12-20, und spezifische Schleifenergie e_c , Bild 12-21, durch die zu analysieren-

den Schmierstrategien in Kombination mit den variierenden Schleifstellgrößen beeinflusst werden.

Bei der Analyse des Einflusses der Schmierstrategie auf die Oberflächenkennwerte R_a , R_z und R_{mr} (5 %; - 0,4 μm) kann festgestellt werden, dass kaum ein nennenswerter Einfluss sichtbar ist. Dies spricht dafür, dass die werkzeugseitige Grenze der erreichbaren Oberflächenqualität im ausgewählten Bereich der Schleifstellgrößen erreicht ist und durch eine Schmierung keine nennenswerten Vorteile zu erzielen sind. Eine weitere Verbesserung der Rauheitskenngrößen ist hierbei beispielsweise mithilfe einer Optimierung der Werkzeugstellgrößen möglich. Einzelne Erkenntnisse hinsichtlich des Zusammenhanges der Schmierstrategie mit der erzeugten Oberflächenqualität können trotzdem qualifiziert werden. Bei allen getesteten Umfangsgeschwindigkeiten v_s in Kombination mit der höchsten eingesetzten Zustellung $a_e = 0,021$ mm ist eine Verbesserung der Oberflächenkennwerte schon unter der Verwendung der Kühlschmierstoffbenetzung des Werkzeuges und der Schiene gegenüber einer Trockenbearbeitung sichtbar. Bei der Überflutungskühlung erfolgt hierbei eine weitere geringe Reduktion der Rauheitskennwerte R_a und R_z bzw. die Erhöhung des Materialanteils R_{mr} (5 %; - 0,4 μm). Quantitativ können dabei durch die Variation der Kühlschmierstoffstrategie Verbesserungen von bis zu 5 % erzielt werden. Tendenziell werden bei der Bearbeitung mit der Überflutungskühlung die geringsten Absolutwerte des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinaten R_a und mittleren größten Höhe des Profils R_z sowie die höchsten Materialanteile R_{mr} (5 %; - 0,4 μm) erreicht. Der Einsatz der Kühlschmierstoffbenetzung des Werkzeuges und der Schiene bringt ebenfalls teilweise sichtbare Verbesserungen der Oberflächenkennwerte im Vergleich mit der Trockenbearbeitung mit sich. Wie im Kapitel 7.1 festgestellt, liegen die Absolutwerte von den Oberflächenkennwerten in einem für das Schienenschleifen feinen Größenbereich.

Bei der Analyse des Einflusses der Schmierstrategie auf die Schienenrandzone ist festzuhalten, dass die KSS-Strategie bei den weniger produktiven und dynamischen Schleifprozessen bei der Zustellungen $a_e = 0,007$ μm und $v_s = 30$ m/s und $v_s = 40$ m/s einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} und Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{CO} ausübt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass dadurch kaum Unterschiede in der Randzonenbeschaffenheit zu erwarten sind. Gleichzeitig wird der Einfluss der Schmierstrategie auf das Maß der Randzonenveränderung bei einer weiteren Steigerung der Zustellung auf $a_e = 0,014$ mm und $a_e = 0,021$ mm, verbunden mit einer Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit bis $v_s = 50$ m/s, immer größer. Bei der Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 50$ m/s in Kombination mit der Zustellung $a_e = 0,021$ μm kann durch den Einsatz der Überflutungskühlung eine Steigerung der M_{max} -Werte von etwa 25 % beobachtet werden, was im Vergleich zur Trockenbearbeitung ein wesentlich geringeres Maß der thermischen Randzonenveränderung bedeutet.



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

- v_s variabel
- $Q'_w = 2,57 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- $Q'_w = 5,14 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- ▣ $Q'_w = 7,71 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- a_e variabel
- $v_f = 22,00 \text{ m/min}$
- $a_p = 20,00 \text{ mm}$

Gegenlauf
variable Schmierstrategien

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

- zylindrische Schleifscheibe
- STELLA KERAMIK
- $300 \times 30 \times 127 \text{ mm}^3$
- Korngröße 20 Mesh
- 100 % Schmelzkorund
- Kunstharzbindung
- Härte Q (hart)
- Struktur 4

Werkstück / Schiene

- gerade Vignolschiene S49
- VOESTALPINE AG
- Stahl R260
- $l = 140 \text{ mm}$
- $T_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Bild 7-11: Einfluss der Schmierstrategie sowie der Prozessstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s und bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_w auf den arithmetischen Mittelwert der Profildordinaten R_a und die maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max}

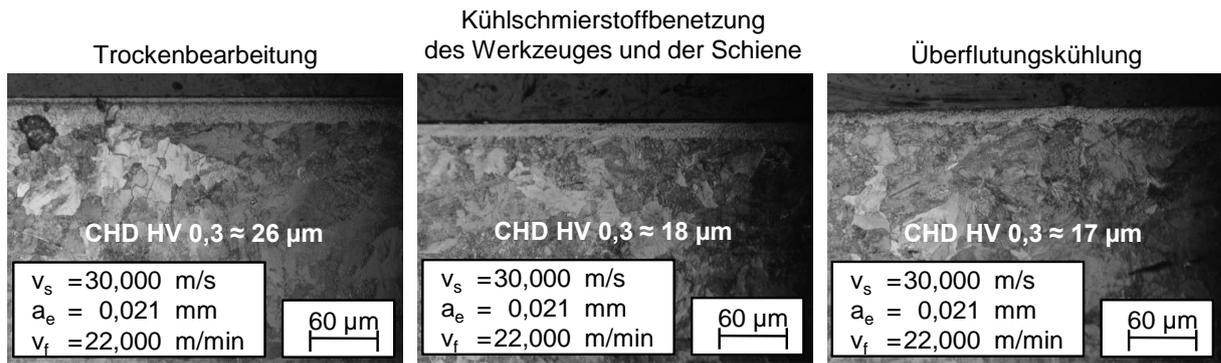
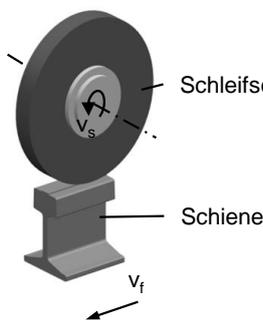
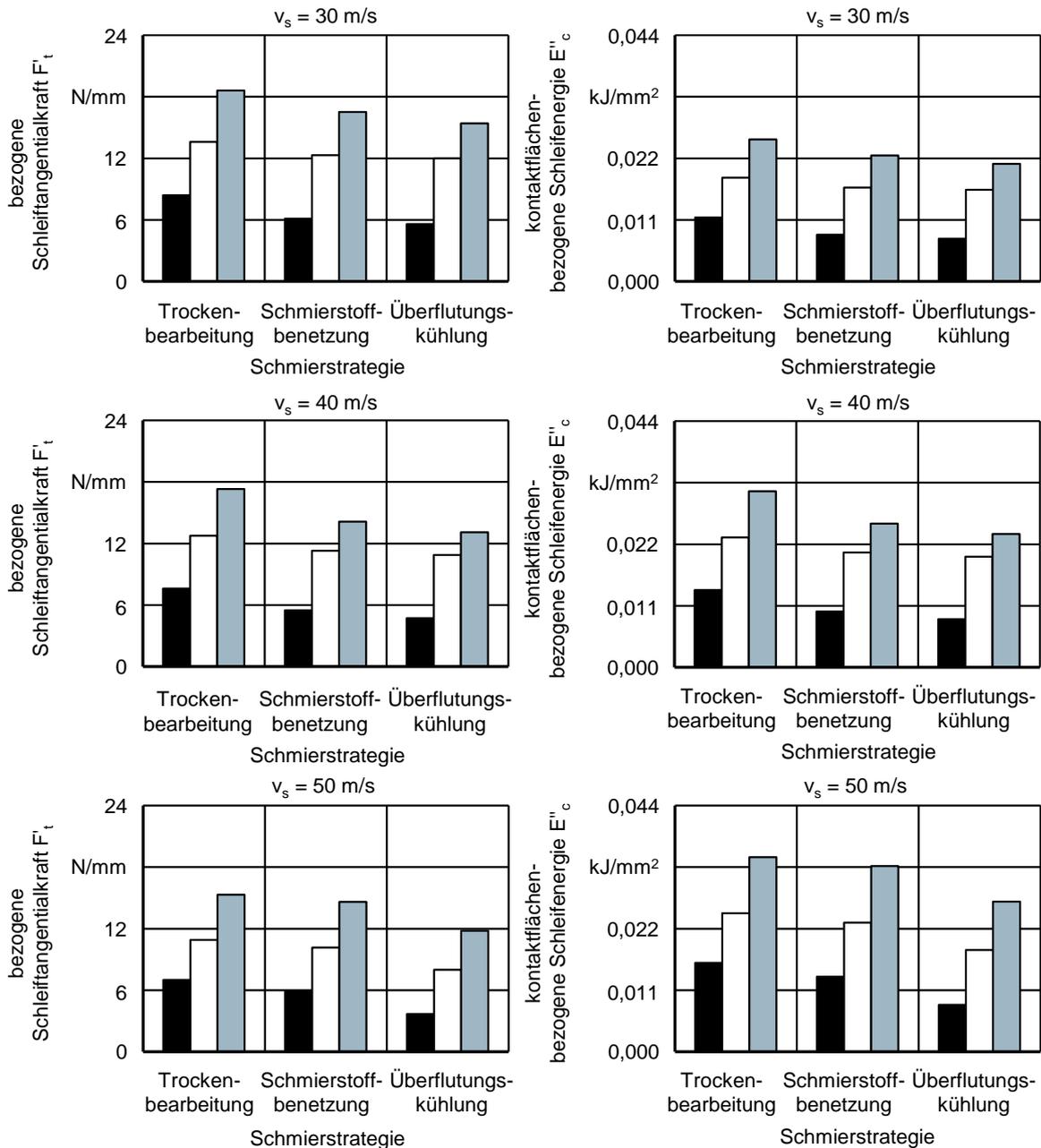


Bild 7-12: Einfluss der Schmierstrategie auf die Beschaffenheit der Randzone von Schienen

Des Weiteren können konkrete Prozessparameterbereiche identifiziert werden, bei welchen schon die Schmierstrategie der Kühlschmierstoffbenetzung des Werkzeuges und der Schiene gegenüber der Trockenbearbeitung nennenswerte Reduktionen des Maßes der thermischen Randzonenbeeinflussung verursacht. So können bei Umfangsgeschwindigkeiten von $v_s = 30 \text{ m/s}$ und $v_s = 40 \text{ m/s}$ in Kombination mit einer Zustellung von $a_e = 0,021 \text{ mm}$ durch diese Schmierstrategie die Werte der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} um bis zu 15 % gegenüber einer Trockenbearbeitung reduziert werden. Konkret führt das für die Randzoneneigenschaften zu einer Reduktion der Härtungstiefe um $\Delta\text{CHD HV } 0,3 = 8 \text{ µm}$. Bei der Betrachtung der durch die untersuchten Schmierstrategien in Kombination mit den Schleifstellgrößen erzeugten kontaktflächenbezogenen Schleifenergien E''_c ist festzustellen, dass diese mit den Werten der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} umgekehrt proportional und mit den Werten der Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} proportional korrelieren. Durch die Zufuhr des Kühlschmierstoffes schon in relativ geringen Mengen können dadurch zum einen Reduktionen der durch die Reibung entstehenden Wärme sowie der Abfall der für die Spanabtrennung notwendigen Energie umgesetzt werden. Ferner findet dadurch eine verbesserte Energieabfuhr aus der Schiene in den Kühlschmierstoff statt. Damit fließen geringere Wärmebeiträge in die Schienenrandzone ein und beeinflussen somit in geringeren Maßen die thermische Randzonenveränderung. Mit einer Steigerung des Schmiervolumens nehmen außerdem die bezogenen Tangentialkräfte F'_t und kontaktflächenbezogene Schleifenergien E''_c tendenziell ab.

7 Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen



Schleifprozess
Längs-Umfangs-Planschleifen
Schleifstellgrößen
 v_s variabel
■ $Q'_w = 2,57$ mm³/mms
□ $Q'_w = 5,14$ mm³/mms
■ $Q'_w = 7,71$ mm³/mms
 a_e variabel
 $v_f = 22,00$ m/min
 $a_p = 20,00$ mm
Gegenlauf
variable Schmierstrategien
Maschine
Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge
zylindrische Schleifscheibe
STELLA KERAMIK
300 x 30 x 127 mm³
Korngröße 20 Mesh
100 % Schmelzkorund
Kunstharzbindung
Härte Q (hart)
Struktur 4
Werkstück / Schiene
gerade Vignolschiene S49
VOESTALPINE AG
Stahl R260
 $l = 140$ mm
 $T_s = 20$ °C

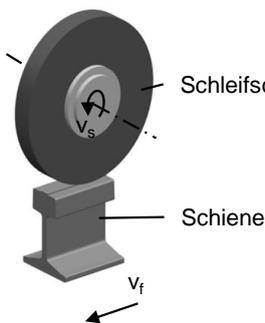
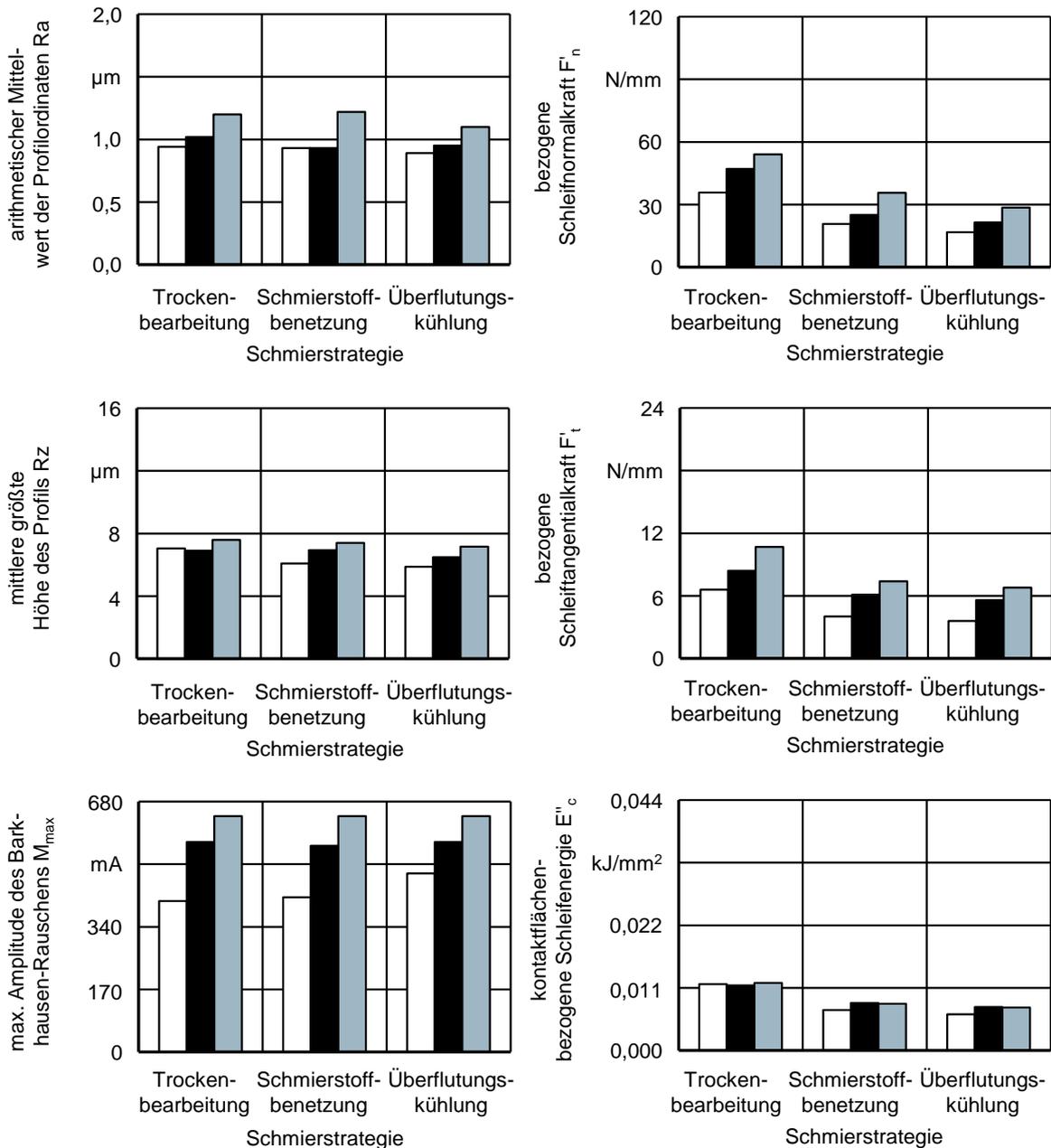
Bild 7-13: Einfluss der Schmierstrategie sowie der Prozessstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s und bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_w auf die bezogene Schleiftangentialkraft F_t und kontaktfächenbezogene Schleifenergie E''_c .

In Bild 7-14 ist der Einfluss der Schmierstrategie in Kombination mit variablen Vorschubgeschwindigkeiten v_f auf die Bearbeitungsergebnisse in Form des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinaten R_a , der größten mittleren Höhe des Profils R_z und der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} sowie auf die Schleifkennwerte in Form der bezogenen Schleifnormal- F'_n , Tangentialkräfte F'_t und der kontaktflächenbezogenen Schleifenergie E''_c dargestellt. Bild 12-22 zeigt weiterhin den Einfluss der Schmierstrategie in Kombination mit den variablen Vorschubgeschwindigkeiten v_f auf den Materialanteil R_{mr} (5 %; - 0,4 μm), die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , die kontaktflächenbezogene Schleifleistung P''_c sowie die spezifische Schleifenergie e_c .

Bei einer Steigerung der im Schleifprozess eingesetzten Schmiermengen nehmen die R_a - und R_z -Werte leicht ab. Jedoch ist diese Verbesserung des Bearbeitungsergebnisses zum großen Teil relativ gering, so fällt beispielsweise der arithmetische Mittelwert der Profilordinaten R_a um etwa 2 % beim Einsatz der Schmierstoffbenetzung des Schleifwerkzeuges und der Schiene bzw. um etwa 5,5 % bei dem Einsatz der Überflutungskühlung vergleichbar mit einer Trockenbearbeitung ab. Die Werte des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinaten liegen stets im Bereich $0,8 \mu\text{m} \leq R_a \leq 1,2 \mu\text{m}$. Bei der Analyse des Einflusses der Schmierstrategie auf den Materialanteil R_{mr} (5 %; - 0,4 μm) ist festzuhalten, dass zwar kaum eine Veränderung der R_{mr} (5 %; - 0,4 μm)-Werte durch den Einsatz der Kühlschmierstoffbenetzung sichtbar wird, jedoch unter Verwendung der Überflutungskühlung eine eindeutige Steigerung der R_{mr} (5 %; - 0,4 μm)-Werte festgestellt werden kann.

Das Maß der Randzonenveränderung bleibt im Falle der Vorschubgeschwindigkeiten $v_f = 22 \text{ m/min}$ und $v_f = 27 \text{ m/min}$ bei allen eingesetzten Schmierstrategien etwa gleich. Bei der Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 17 \text{ m/min}$ nimmt das Maß der Randzonenveränderung mit der Steigerung der KSS-Mengen leicht ab, was anhand steigender Werte der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} offensichtlich ist. Die Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit v_f führt aufgrund höherer Spannungslängen l_g zu höheren Werten der bezogenen Schleiftangentialkraft F'_t . Gleichzeitig bleiben die ermittelten Werte der kontaktflächenbezogenen Schleifenergie E''_c für alle drei untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten v_f im gleichen Bereich. Das festgestellte höhere Maß der thermischen Randzonenveränderung bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten v_f lässt erneut vermuten, dass bei den untersuchten Prozessen weniger die Schleiftangentialkraft F'_t sondern mehr die Kontaktzeit Δt die Veränderung der Randzonenbeschaffenheit hervorrufen.

7 Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

$v_s = 30,000$ m/s

□ $Q'_w = 1,980$ mm³/mms

■ $Q'_w = 2,570$ mm³/mms

▣ $Q'_w = 3,160$ mm³/mms

$a_e = 0,007$ mm

v_f variabel

$a_p = 20,000$ mm

Gegenlauf

variable Schmierstrategien

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

zylindrische Schleifscheibe

STELLA KERAMIK

300 x 30 x 127 mm³

Korngröße 20 Mesh

100 % Schmelzkorund

Kunstharzbindung

Härte Q (hart)

Struktur 4

Werkstück / Schiene

gerade Vignolschiene S49

VOESTALPINE AG

Stahl R260

$l = 140$ mm

$T_s = 20$ °C

Bild 7-14: Einfluss der Schmierstrategie sowie des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w mit veränderlicher Vorschubgeschwindigkeit v_f auf die bezogene Schleiftangentalkraft F'_t und kontaktfächenbezogene Schleifenergie E''_c .

Die im Kapitel 7.1 identifizierten Zusammenhänge hinsichtlich des Einflusses der Schleifstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s , Zustellung a_e und Vorschubgeschwindigkeit v_f auf die Bearbeitungsergebnisse und Schleifkennwerte wiederholen sich auch für die hiermit untersuchten Schmierstrategien. Mit der Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit v_s nehmen aufgrund der Reduktion der Spannungsdicken h_{cu} die Rauheitskenngrößen Ra und Rz kontinuierlich ab und die Materialanteile Rmr (5 %; - 0,4 μm) zu. Die Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit v_s führt des Weiteren zur Reduktion der Werte der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} und der Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} und somit zu einem höheren Maß der thermischen Randzonenbeeinflussung. Mit einer Steigerung der Zustellung a_e nehmen der arithmetischer Mittelwert der Profilkordinaten Ra und die mittlere größte Höhe des Profils Rz zu, während die Materialanteile Rmr (5 %; - 0,4 μm) abfallen. Bei einer Zunahme der Zustellung a_e erfolgt des Weiteren eine Reduktion von M_{max} - und H_{co} -Werten, was für höhere Härtungstiefen in den Schienenrandzonen spricht. Die Zustellung bleibt gegenüber der Umfangsgeschwindigkeit v_s im untersuchten Parameterfeld die Schleifstellgröße mit höherer Signifikanz bezüglich des Einflusses auf die Oberflächen- und Randzonenkennwerte. Eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit v_f führt zur Steigerung des arithmetischen Mittelwertes der Profilkordinaten Ra und der mittleren größten Höhe des Profils Rz sowie zur Reduktion des Materialanteils Rmr (5 %; - 0,4 μm).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die untersuchten Schmierstrategien zum Teil einen großen Einfluss auf die Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen haben. Schon der Einsatz der in der Praxis einfach zu realisierenden Kühlschmierstoffbenetzung des Werkzeuges und der Schiene führt bei Zustellungen von $a_e = 0,021 \text{ mm}$ zur nennenswerten Verbesserung der Oberflächenkenngrößen. In Bezug auf die Veränderung der Randzonenbeschaffenheit der Schienen können ebenfalls Bereiche der Schleifstellgrößen identifiziert werden, in denen der Einfluss der Schmierstrategie sichtbare Verbesserungen gegenüber einer Trockenbearbeitung liefert. Bei Zustellungen von $a_e \geq 0,014 \mu\text{m}$ ist eine eindeutige Reduktion des Maßes der Randzonenveränderung mit einer Steigerung der im Prozess verwendeten Schmiermengen zu sehen. Es hat sich allerdings auch gezeigt, dass bei einzelnen Kombinationen der Prozessstellgrößen weder die Schmierstrategie der Schmierstoffbenetzung des Werkzeuges und Werkstückes, noch die Schmierstrategie der Überflutungskühlung nennenswerte positive Effekte vergleichbar mit der Trockenbearbeitung mit sich bringen. Dies liegt daran, dass möglicherweise für diese Bearbeitungsbereiche eine werkzeugseitige Grenze erreicht ist. Dies kann anhand der Tatsache der Erzielung der sehr feinen Rauheiten schon unter Verwendung des groben Schleifkornes (20 Mesh) untermauert werden.

Unter Berücksichtigung der festgestellten Zusammenhänge ist zu empfehlen, dass bei produktiven Schienenschleifprozessen mit bezogenen Zeitspannungsvolumina $Q'_w \geq 5,14 \text{ mm}^3/\text{mms}$ eine Schmierstoffbenetzung des Werkzeuges und der Schiene zur Herstellung höherer Bearbeitungsqualitäten umgesetzt werden sollte.

7.4 Werkzeugstellgrößen

Durch einen Einsatz von geeigneten Korn- und Bindungsmaterialien in Kombination mit einer an den Anwendungsfall angepassten volumetrischen Schleifwerkzeugzusammensetzung können die Bearbeitungsergebnisse in Form von den Oberflächen- und Randzonenkennwerten beeinflusst werden. Nach derzeitigem Stand der Technik werden für das Schienenschleifen meist grobkörnige Schleifwerkzeuge eingesetzt, die universell für diverse Anwendungen aus dem Bereich der Produktionstechnik ausgelegt sind. In den Schleifwerkzeugen werden Schmelzkorundkörnungen mit den Korngrößen 16 - 24 Mesh kombiniert mit Kunstharzbindungen eingesetzt. Über den Einfluss werkzeugseitiger Stellgrößen, wie der Korngröße, Struktur und Kornart bzw. dem Kornanteil, in Kombination mit den Prozessstellgrößen, auf die Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen ist nur wenig bekannt. Im Rahmen der Vorversuche zum Schienenschleifen wurde aufgezeigt, dass die marktüblichen Werkzeuge einen guten Verschleißwiderstand in Form eines geringen Werkzeugradialverschleißes Δr_s haben, Bild 7-2. Jedoch verursachen diese teilweise eine massive Veränderung der Randzonenbeschaffenheit an den Schienen, bis hin zur Oberflächenzerrütung in Form von Rissbildungen, Bild 7-1. Der thermische Einfluss auf die Randzone kann unter anderem durch eine verbesserte Wärmeabfuhr durch das Werkzeug reduziert werden. Hierzu sind eine Verwendung von Werkzeugkomponenten mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit bzw. eine Anpassung der volumetrischen Werkzeugzusammensetzung der Schleifwerkzeuge sinnvoll. Im Rahmen des aktuellen Kapitels besteht daher das Ziel, eine Wissensbasis über den Einfluss von Prozessstellgrößen bei variierenden Werkzeugstellgrößen auf die Oberflächen- und Randzonenkenngrößen der Schienen sowie die Prozesskennwerte der Schleifbearbeitung zu generieren. Zum Erreichen des gestellten Ziels werden die technologischen Untersuchungen zum Schienenschleifen unter Verwendung mehrerer Schleifwerkzeugspezifikationen durchgeführt, wobei der Einfluss der insgesamt drei folgenden werkzeugseitigen Stellgrößen analysiert wird:

- Korngröße,
- Struktur,
- Art- und Anteile der Kornwerkstoffe.

Unter der Korngröße wird der mittlere Korndurchmesser r_k betrachtet. Durch dessen Steigerung bei unveränderter volumetrischer Zusammensetzung wird die Abtrennung höherer Materialvolumina realisiert, da die Einzelkornspannungsdicken h_{cu} zunehmen. Die Reduktion des mittleren Korndurchmessers r_k führt zur Verbesserung der Oberflächenkennwerte, da die Anzahl der aktiven Schneiden steigt. Dadurch kann ein verbessertes Kornsplitterungsverhalten realisiert werden, da die Sekundärschneiden zu einem schnelleren Eingriff gebracht werden. Aufgrund der Tatsache, dass feinkörnige Schleifwerkzeuge gleichmäßigere Werkzeugtopographien aufweisen, ist die Gesamtbelastung des Werkzeuges über mehrere Körner verteilt. Dies führt tendenziell zu einem stabileren Einzelkornverschleißverhalten. Der mittlere Schleifkorndurchmesser r_k wird tendenziell in Form der Mesh-Zahl angegeben. Dabei gilt für konventionelle Schleifwerkzeuge: Je geringer der Mesh-Wert, umso größer der mittlere Korndurchmesser $d_{r_{kg}}$ und entsprechend gröber das Schleifwerkzeug. Im Rahmen der technologischen Untersuchungen werden drei Korngrößen, 16 Mesh, 20 Mesh und 24 Mesh (alle entsprechen einem für die Schleifbearbeitung sehr groben Bereich), die die mittleren Korndurchmessern $d_{kg} \approx 1,30$ mm, 1,10 mm und 0,78 mm aufweisen, analysiert.

Die Struktur ist die Werkzeugstellgröße, die das Verhältnis der Volumenanteile des Korn- und Bindungswerkstoffes darstellt. Diese Werkzeugstellgröße kann oft mit der Porosität des Werkzeuges gleich gesetzt werden. Dabei ist die Struktur insbesondere vom volumetrischen Anteil der Korngröße abhängig. Die Struktur liefert des Weiteren Aussagen, wie stark das Schleifkorn an die Bindung angebunden ist. Weder die Spannungslängen, noch der Wirkkontakt wird durch diese Werkzeugstellgröße beeinflusst. Die Struktur kann einen Zahlenwert von 1 bis 30 einnehmen. Dabei je höher der Zahlenwert ist, umso offener / poröser ist das Schleifwerkzeug [KLO86]. Für die Untersuchungen zum Schienenschleifen wird der Einfluss von zwei Struktur-Zahlenwerten, Struktur 4 und Struktur 8, auf das Werkzeugeinsatzverhalten und die Bearbeitungsergebnisse analysiert.

Mithilfe einer Kombination mehrerer Korundarten und -anteile in einem Schleifwerkzeug kann die Gesamtwerkzeugbelastung reduziert und das Werkzeugverhalten optimiert werden. In Bezug auf Korunde (Al_2O_3) bietet insbesondere eine Kombination des Schmelz- und der Sinterkorundes Potenzial und ist industriell bekannt. Die Schmelz- und Sinterkorunde unterscheiden sich dabei laut Herstellerangaben zum einen in ihrem Reinheitsgrad und den Dotierungen mit seltenen Erden, wie Tabelle 7-2 zeigt. Der weiterer Unterschied besteht in dem kristallinen Aufbau beider Kornwerkstoffe. Während es sich beim Sinterkorund um einen mikrokristallinen Korund mit einer Kristallgröße von ca. $0,2\ \mu\text{m}$ handelt, wird der Schmelzkorund im Schmelzverfahren hergestellt und hat wesentlich höhere Kristallgrößen von ca. $500 - 1000\ \mu\text{m}$. Entsprechend weisen beide Kornwerkstoffe ein ungleiches Einzelkornverschleißverhalten auf. Während der Schmelzkorund größtenteils makrokristallines Splittern als vorherrschendes Einzelkornverschleißmechanismus hat, weist der Sinterkorund das mikrokristalline Verschleißverhalten auf. Dies verschafft dem Sinterkorund die Vorteile hinsichtlich der Prozess- und Werkzeugstabilität gegenüber dem Schmelzkorund. Jedoch werden die Sinterkorunde aufgrund der hohen Herstellungskosten tendenziell nur anteilig als Mischelement in den Schmelzkorundwerkzeugen eingesetzt [KLO86]. Bei den technologischen Untersuchungen zur Analyse des Einflusses der Werkzeugspezifikation werden Schleifwerkzeugspezifikationen mit den Sinterkorundanteilen von 15 % und 30 % eingesetzt. Es wird erwartet, dass der Sinterkorund als Mischelement der Schmelzkorundwerkzeuge zu geringeren Schleifenergien und einer Verbesserung von Arbeitsergebnissen hinsichtlich des Maßes der Randzonenveränderung beitragen kann. Als Referenz kommt zur Bewertung der Sinterkorundwerkzeuge eine dritte, ausschließlich mit Schmelzkorund besetzte, Schleifwerkzeugspezifikation zum Einsatz.

Tabelle 7-2: Chemische Zusammensetzung der Schmelz- und Sinterkorunde

Korundart	Chemische Zusammensetzung Elemente / Werkstoffgruppen [%]				
	Al_2O_3	MgO	Nd_2O_3	TiO_2	SiO_2
Schmelzkorund	94,0 - 97,0 %	0,75 - 1,50 %	1,30 - 3,00 %	k. A.	k. A.
Sinterkorund	96,2 %	0,15 - 0,58 %	0,70 - 1,20 %	$\leq 0,025\ %$	$\leq 0,025\ %$

Für die technologischen Untersuchungen zur Analyse des Einflusses der Werkzeugstellgrößen auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte beim Schienenschleifen kommen somit insgesamt acht Werkzeugzusammensetzungen zum Einsatz, Tabelle 4-3. Aufgrund der in den vorherigen Abschnitten identifizierten Tatsache des dominanten Einflusses der Zustellung a_e wird bei den Prozessstellgrößen einzig dieser Parameter im Bereich

$0,007 \mu\text{m} \leq a_e \leq 0,021 \mu\text{m}$ als Bestandteil des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_W variiert, während die Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30 \text{ m/s}$ sowie Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 22 \text{ m/min}$ konstant bleiben. Die zu analysierenden Zielgrößen sind, wie auch in den vorherigen Kapiteln, die Oberflächenkennwerte arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten R_a , mittlere größte Höhe des Profils R_z , Materialanteil R_{mr} (5 %; $-0,4 \mu\text{m}$) sowie die das Maß der Randzonenveränderung beschreibenden Kenngrößen maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} und Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} . Alle Schleifwerkzeuge werden systematisch nach definierten abgetrennten Spannungsvolumina $V_W = 940,8 \text{ mm}^3$ mit den im Kapitel 4.7 genannten Abrichtparametern abgerichtet.

Um ein besseres Verständnis über die tatsächliche volumetrische Zusammensetzung der ausgewählten Schleifwerkzeuge zu gewinnen, werden alle Werkzeugspezifikationen im Vorfeld mittels der Computertomographie (CT) hinsichtlich der Anteile einzelner Phasen im Werkzeuggefüge analysiert. In Bild 7-15 ist die volumetrische Zusammensetzung von Schleifwerkzeugen mit variabler Korngröße dargestellt. Bei allen untersuchten Schleifwerkzeugen liegen die Kornanteile bei etwa 60 - 64 % unabhängig der eingesetzten Korngröße. Es werden weiterhin Bindungsvolumina von etwa 24 - 26 % sowie Anteile des Porenraumes von 13 - 15% gemessen. Durch diese Messreihe wird aufgezeigt, dass die untersuchten Schleifwerkzeuge sich im Wesentlichen durch die Korngröße bzw. den mittleren Korndurchmesser d_{kg} unterscheiden, während die Volumina der Phasenanteile vergleichbar sind.

In Bild 7-16 sind die Ergebnisse der CT-Analysen der Schleifwerkzeuge mit der variablen Struktur gezeigt. Hierbei ist zu sehen, dass höhere Strukturen geringere Anteile der Körnung und entsprechend höhere Volumina der Bindung sowie des Porenraumes mit sich bringen. Beim Übergang von der Struktur 4 zur Struktur 8 ist eine Reduktion des Kornanteils um etwa 5 % zu verzeichnen, die durch die Steigerung der Anteile der Bindung und des Porenraumes kompensiert wird.

In Bild 7-17 ist die volumetrische Zusammensetzung der Schleifwerkzeugen mit variablem Sinterkorundanteil gezeigt. Dabei fällt auf, dass die gemessenen Anteile des Sinterkorundes um etwa 5 % geringer ausfallen, als vom Hersteller angegeben. In der Werkzeugspezifikation mit 15 % Sinterkorund liegt dessen realer Anteil bei 10 % und bei dem Schleifwerkzeug mit 30 % Sinterkorund wird lediglich der 25 %-Anteil dieses Kornwerkstoffes gemessen. Gegenüber den reinen Schmelzkorundsleifwerkzeugen haben die Sinterkorundsleifwerkzeuge ähnliche Volumina des Bindungs- und Porenraumes. Die gesteigerten Sinterkorundanteile werden also ausschließlich durch eine entsprechende Reduktion des Schmelzkorundanteils realisiert.

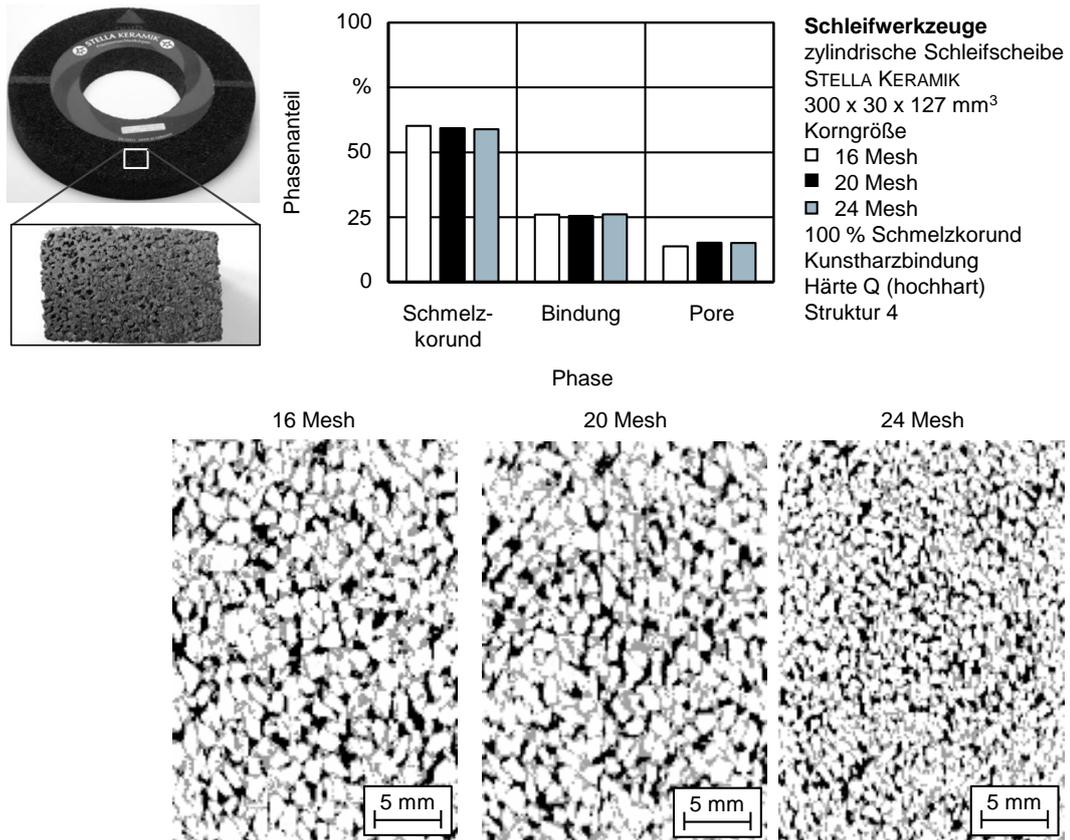


Bild 7-15: Volumetrische Zusammensetzung von Schleifwerkzeugen mit variabler Korngröße

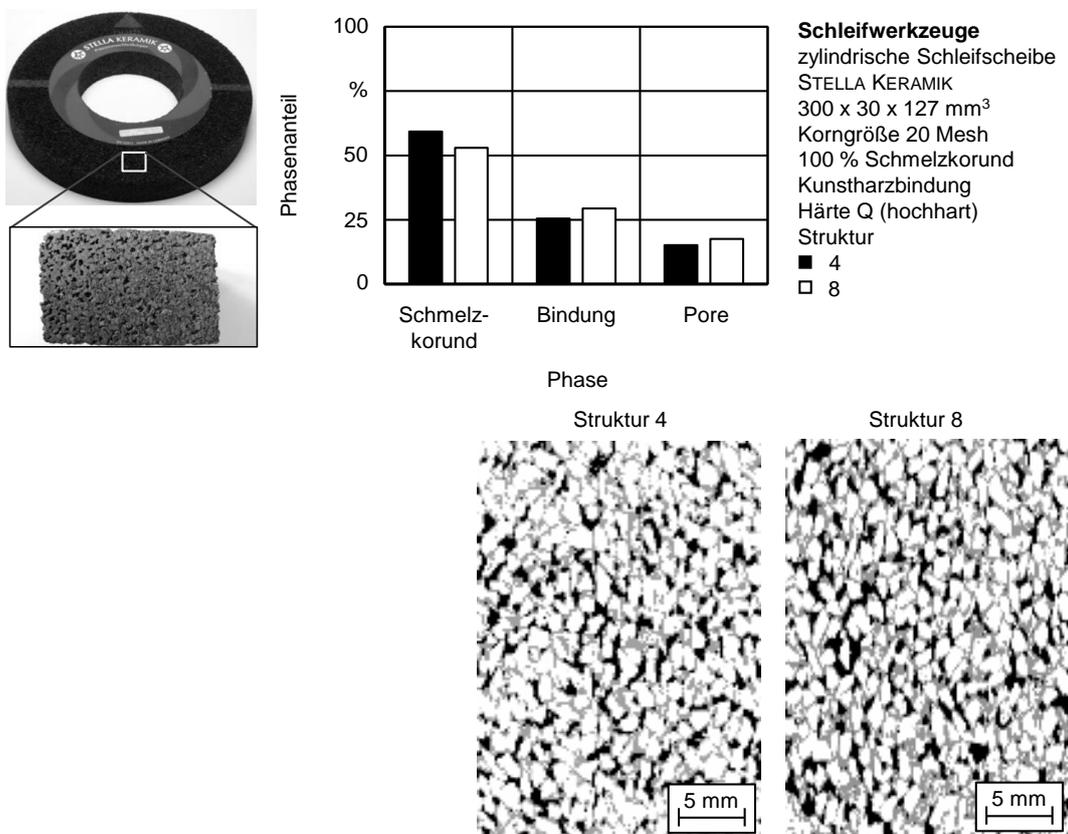


Bild 7-16: Volumetrische Zusammensetzung von Schleifwerkzeugen mit variabler Struktur

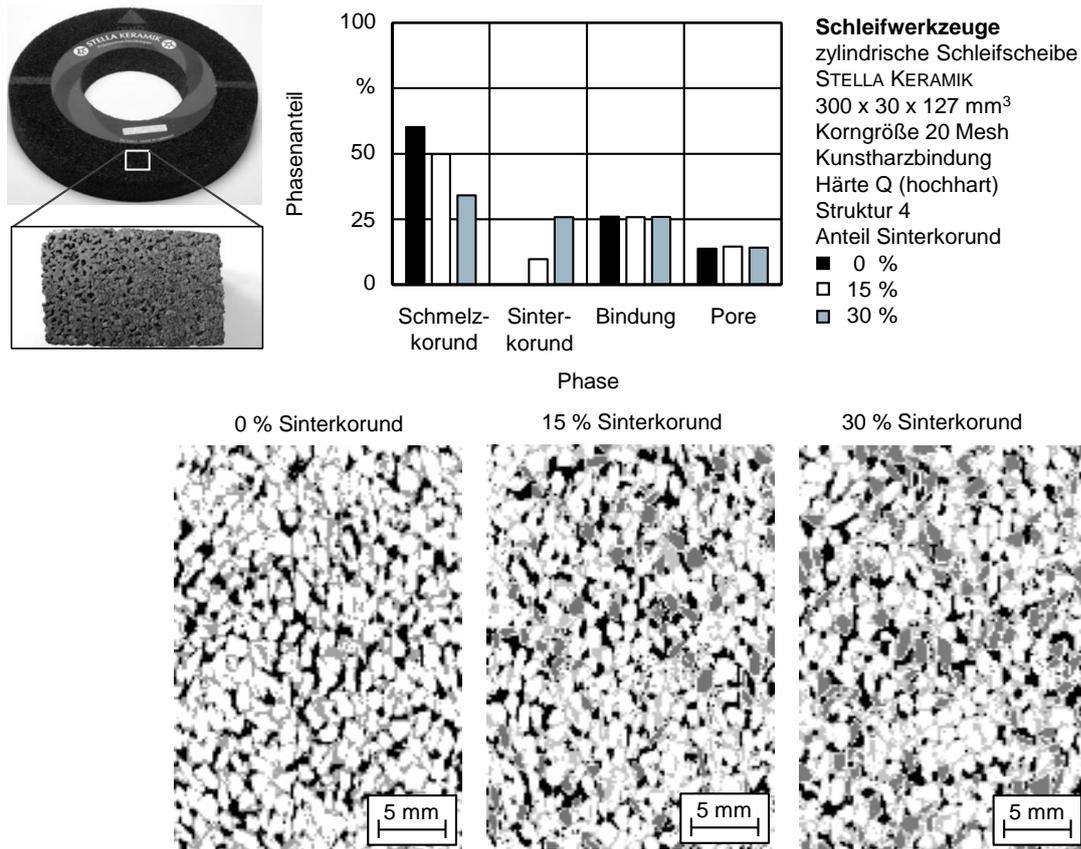
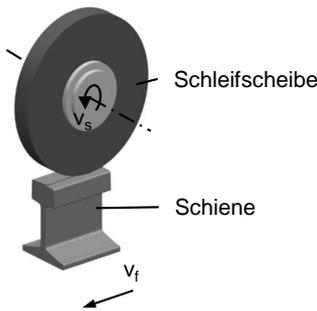


Bild 7-17: Volumetrische Zusammensetzung von Schleifwerkzeugen mit variablem Sinterkorundanteil

In Bild 7-18 ist der Einfluss der Korngröße der Schleifscheiben in Kombination mit den Prozessstellgrößen auf die Bearbeitungsergebnisse in Form des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinaten R_a , der mittleren größten Höhe des Profils R_z , des Materialanteils R_{mr} (5 %; $-0,4 \mu\text{m}$) und der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} sowie die Prozesskennwerte bezogene Schleiftangentialkraft F'_t und kontaktflächenbezogene Schleifenergie E''_c dargestellt. In Bild 12-23 ist des Weiteren gezeigt, wie die variable Korngröße die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , die bezogene Schleifnormalkraft F'_n , die kontaktflächenbezogene Schleifleistung P''_c sowie die spezifische Schleifenergie e_c beeinflusst werden. In Bild 7-19 sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Querschliffe der exemplarischen Randzonenzustände gezeigt.



Schleifprozess
 Längs-Umfangs-Planschleifen
Schleifstellgrößen
 $v_s = 30,000$ m/s
 Q'_W variabel
 a_e variabel
 $v_f = 22,000$ m/min
 $a_p = 20,000$ mm
 Gegenlauf
 Trockenbearbeitung
Maschine
 Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge
 zylindrische Schleifscheibe
 STELLA KERAMIK
 $300 \times 30 \times 127$ mm³
 Korngröße
 ■ 16 Mesh
 □ 20 Mesh
 ■ 24 Mesh
 100 % Schmelzkorund
 Kunstharzbindung
 Härte Q (hochhart)
 Kornbesatzdichte 4
Werkstück / Schiene
 gerade Vignolschiene S49
 VOESTALPINE AG
 Stahl R260
 $l = 140$ mm
 $T_s = 20$ °C

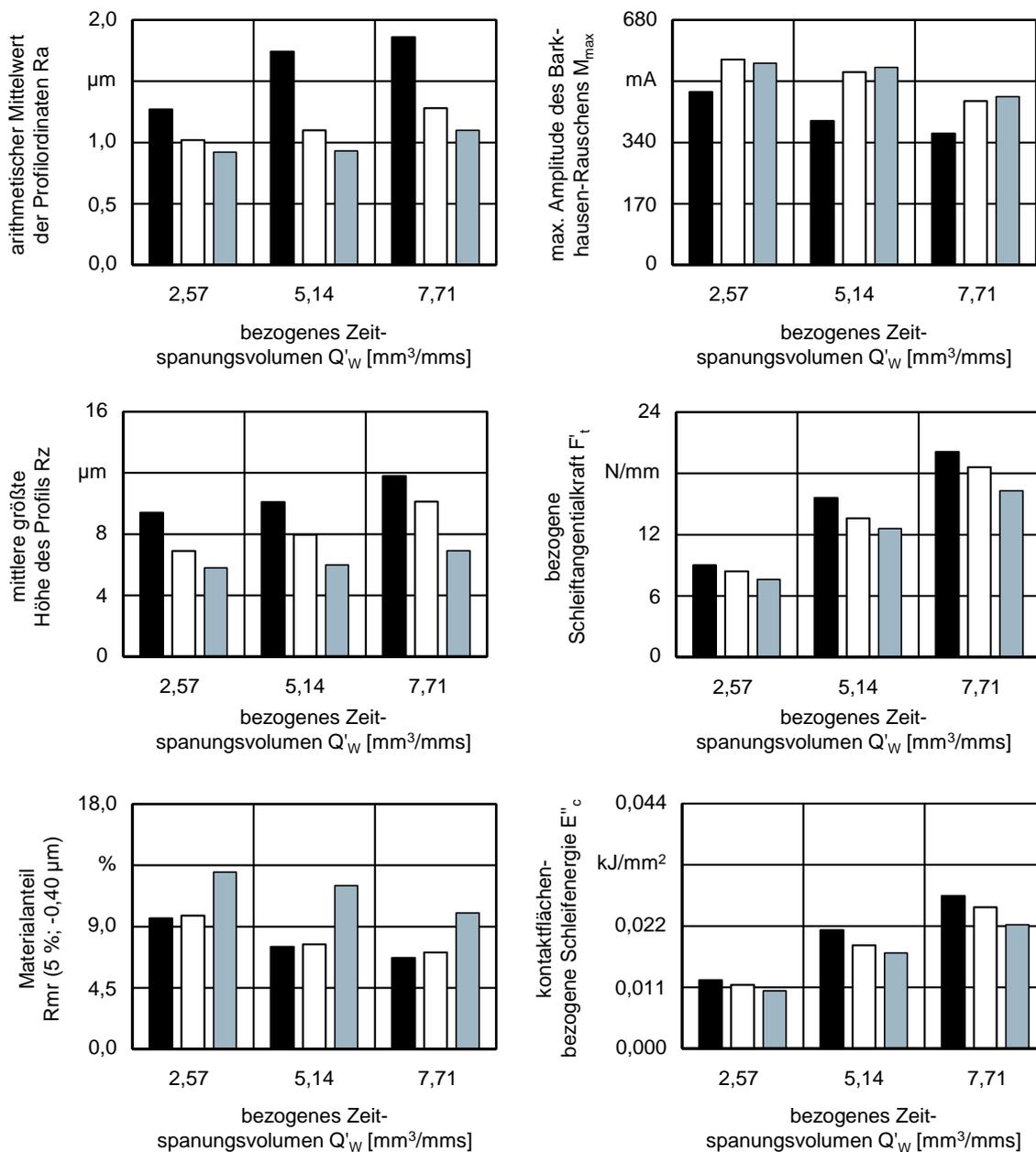


Bild 7-18: Einfluss der Korngröße der Schleifscheiben in Kombination mit den Prozessstellgrößen auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte

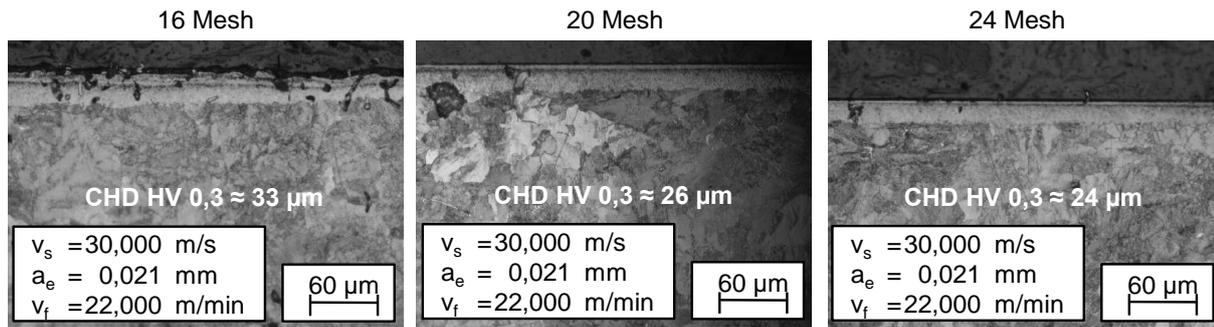


Bild 7-19: Einfluss der Korngröße der Schleifwerkzeuge auf die Randzonenbeschaffenheit

Die Reduktion des mittleren Korndurchmessers im Bereich $d_{kg} = 1,3 - 0,78$ mm verursacht eine systematische Reduktion des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinaten R_a und der mittleren größten Höhe des Profils R_z sowie eine Steigerung des Materialanteils R_{mr} (5 %; - 0,4 μ m). Bei der Zustellung $a_e = 0,007$ mm fallen die R_a -Werte von $R_a \approx 1,4$ μ m auf $R_a \approx 1,1$ μ m ab, die R_z -Werte nehmen um etwa 15 % ab. Die R_{mr} (5 %; - 0,4 μ m)-Werte steigen von R_{mr} (5 %; - 0,4 μ m) ≈ 8 % auf R_{mr} (5 %; - 0,4 μ m) ≈ 15 % auf. Dies ist mit der Reduktion der Einzelkornspannungsdicken h_{cu} zu erklären, die durch die kleiner werdenden mittleren Korndurchmesser d_{kg} und die daraus resultierenden geringeren Kornabstände verursacht werden.

Die größte eingesetzte Korngröße 16 Mesh liefert das mit Abstand größte Maß der Randzonenveränderung, da die maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} am geringsten ausfällt. Auch die an den Querschliffen ermittelte Veränderung der Randzone nimmt mit der Reduktion des mittleren Korndurchmessers d_{kg} ab. Bei dem bezogenen Zeitspannungsvolumen $Q'_w = 7,71$ mm³/mms, Zustellung $a_e = 0,021$ mm, liegt die Härtungstiefe der Randzone bei CHD HV 0,3 = 24 μ m für das Werkzeug mit dem Korn 24 Mesh, während diese Kenngröße bei der größten eingesetzten Korngröße von 16 Mesh noch CHD HV 0,3 = 33 μ m beträgt. Dies ist auf eine Reduktion der Energie für die Spanbildung und -abtrennung zurückzuführen, da die korrespondierenden Werte der bezogenen Schleiftangentialkraft F'_t und kontaktfächenbezogenen Schleifenergie E''_c mit der Reduktion des mittleren Korndurchmessers d_{kg} abnehmen. Die zerspanende Arbeit wird dabei zwar durch eine höhere Zahl an Schleifkörnern durchgeführt, jedoch führen die geringeren Einzelkornkräfte dazu, dass die Gesamtleistung für die Spanabtrennung bei der Reduktion des mittleren Korndurchmessers d_k geringer wird.

Die im Rahmen der Kapitel 7.1 und 7.2 festgestellten Zusammenhänge hinsichtlich des Einflusses des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w unter Variation der Zustellung a_e auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte sind bei allen eingesetzten Korngrößen sichtbar. Die Zustellung $a_e = 0,007$ mm liefert hierbei die mit Abstand günstigsten Werte von Oberflächenkenngrößen und das geringste Maß der Randzonenveränderung. Die bei den Zustellungen $a_e = 0,014$ mm und $a_e = 0,021$ mm erzielten Ergebnisse unterscheiden sich kaum.

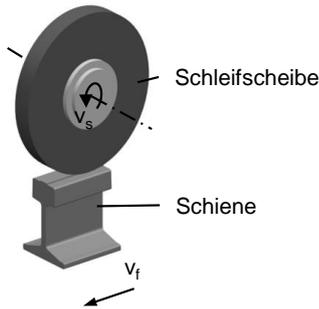
In [Bild 7-20](#) ist der Einfluss der Struktur der Schleifscheiben in Kombination mit den Prozessstellgrößen auf die Bearbeitungsergebnisse in Form des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinaten R_a , der mittleren größten Höhe des Profils R_z , des Materialanteils R_{mr} (5 %; - 0,4 μ m) und der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} sowie

die Prozesskennwerte bezogene Schleiftangentialkraft F'_t und kontaktfächenbezogene Schleifenergie E''_c dargestellt. In Bild 12-24 ist geschildert, wie die variable Struktur die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , die bezogene Schleifnormalkraft F'_n , die kontaktfächenbezogene Schleifleistung P''_c sowie die spezifische Schleifenergie e_c beeinflusst. In Bild 7-21 sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Querschliffe der exemplarischen Randzonenzustände, erzeugt durch Schleifwerkzeuge mit variabler Struktur, gezeigt.

Die Reduktion des Struktur-Zahlenwertes führt zu einer Verbesserung der Rauheitskennwerte arithmetischer Mittelwert der Profildordinaten R_a und mittlere größte Höhe des Profils R_z . Die Schleifwerkzeuge mit dem Struktur-Zahlenwert 4 erzeugen teilweise sehr feine Oberflächen mit Rauheitswerten $R_a \leq 1 \mu\text{m}$. Bei dem Struktur-Zahlenwert 8 fallen die erzielten R_a -Werte tendenziell um 10 - 20 % höher aus. Dies ist auf eine geringere Anzahl der aktiven Schneiden, verursacht durch eine geringere Kornkonzentration, bei einer Erhöhung des Struktur-Zahlenwertes der Schleifwerkzeuge zurückzuführen. Ein Einfluss der Struktur auf den Materialanteil R_{mr} (5 %; - $0,4 \mu\text{m}$) kann im analysierten Bereich der Struktur-Zahlenwerte 4 - 8 nicht eindeutig identifiziert werden.

Der Einfluss des Struktur-Zahlenwertes auf die Veränderung der Randzonenbeschaffenheit ist zwar tendenziell vorhanden, bleibt jedoch relativ gering. Die „offenen“ Schleifwerkzeugspezifikationen mit der Struktur 8 bringen etwas geringere Maße der Randzonenveränderung vergleichbar mit dem Struktur-Zahlenwert 4 mit sich. Der größte Unterschied kann dabei bei dem höchsten analysierten bezogenen Zeitspannungsvolumen $Q'_w = 7,71 \text{ mm}^3/\text{mms}$ beobachtet werden, da die Härtungstiefe CHD HV 0,3 bei der Verwendung eines Schleifwerkzeuges mit der Struktur 8 um 23 % reduziert wird. Trotz der vermutlich höheren bei dem Struktur-Zahlenwert 8 sind die Gesamtkraft- und Energiebeiträge etwas geringer. Die Annahme, dass infolge einer Anpassung des prozentualen Verhältnisses zwischen dem Korn und Bindung ein verbessertes Werkzeugeinsatzverhalten und eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit durch das Schleifwerkzeug zu realisieren ist, scheint damit bestätigt.

7 Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen



Schleifprozess
 Längs-Umfangs-Planschleifen
Schleifstellgrößen
 $v_s = 30.000$ m/s
 Q'_W variabel
 a_e variabel
 $v_f = 22.000$ m/min
 $a_p = 20.000$ mm
 Gegenlauf
 Trockenbearbeitung
Maschine
 Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge
 zylindrische Schleifscheibe
 STELLA KERAMIK
 $300 \times 30 \times 127$ mm³
 Korngröße 20 Mesh
 100 % Schmelkorund
 Kunstharzbindung
 Härte Q (hochhart)
 Struktur
 ■ 4
 □ 8
Werkstück / Schiene
 gerade Vignolschiene S49
 VOESTALPINE AG
 Stahl R260
 $l = 140$ mm
 $T_s = 20$ °C

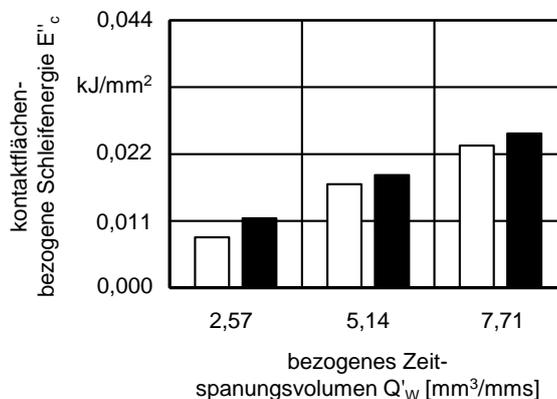
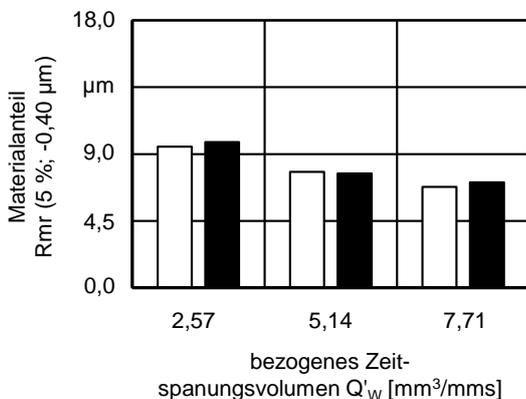
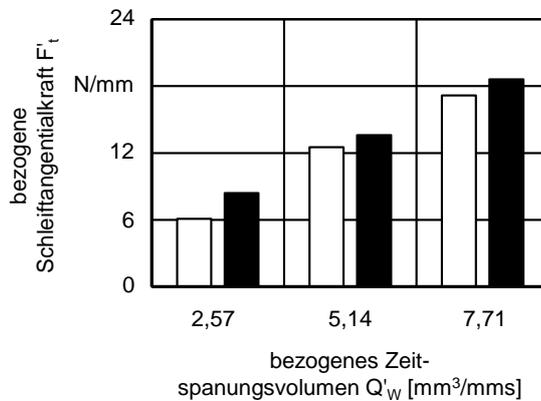
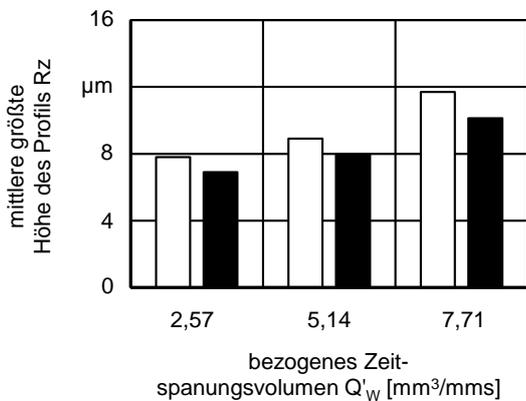
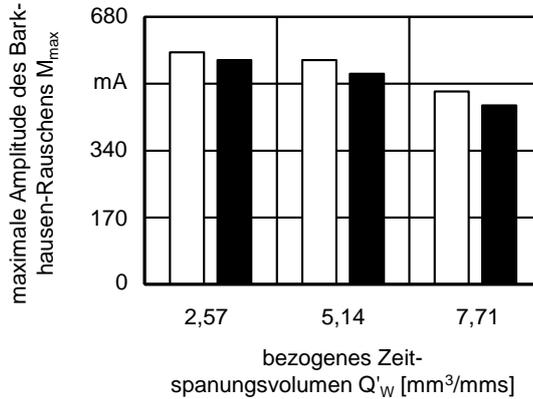
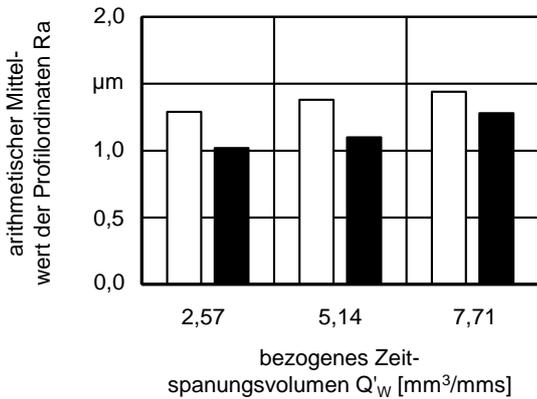


Bild 7-20: Einfluss der Struktur der Schleifscheiben in Kombination mit den Prozessstellgrößen auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte

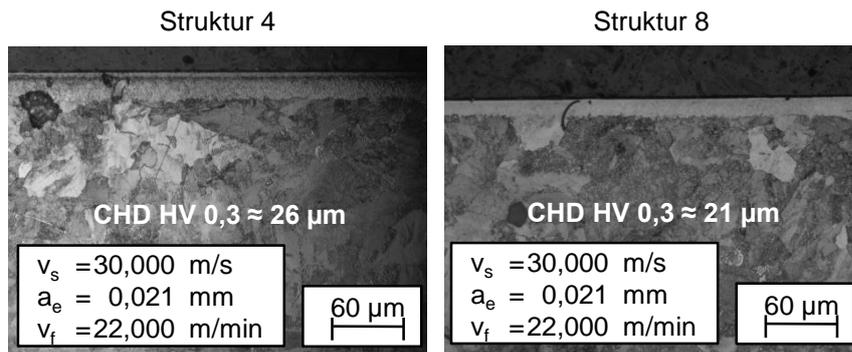
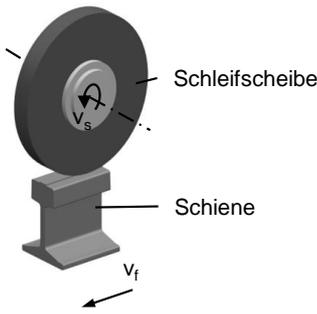


Bild 7-21: Einfluss des Struktur-Zahlenwertes der Schleifwerkzeuge auf die Randzonenbeschaffenheit

In [Bild 7-22](#) ist der Einfluss des Sinterkorundanteils der Schleifscheiben in Kombination mit den Prozessstellgrößen auf die Bearbeitungsergebnisse in Form des arithmetischen Mittelwertes der Profilordinaten R_a , der mittleren größten Höhe des Profils R_z , des Materialanteils R_{mr} (5 %; - 0,4 μm) und der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} sowie die Prozesskennwerte bezogene Schleiftangentialkraft F'_t und kontaktfächenbezogene Schleifenergie E''_c dargestellt. In [Bild 12-25](#) ist gezeigt, wie der variable Sinterkorundanteil die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , die bezogene Schleifnormalkraft F'_n , die kontaktfächenbezogene Schleifleistung P''_c sowie die spezifische Schleifenergie e_c beeinflusst. In [Bild 7-23](#) sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Querschliffe der exemplarischen Randzonenzustände gezeigt, die unter Verwendung der Schleifwerkzeuge mit variablem Sinterkorundanteil erzeugt wurden.

Mit einer Steigerung des Sinterkorundanteils ist eine systematische Verschlechterung von alle untersuchten Oberflächenkennwerten R_a , R_z und R_{mr} (5 %; - 0,4 μm) zu verzeichnen. Beispielsweise steigen beim Einsatz der Schleifwerkzeuge mit einem Sinterkorundanteil von 30 % die arithmetischen Mittelwerte der Profilordinaten R_a um bis zu 50 % im Vergleich zu einem reinen Schmelzkorundwerkzeug. Sehr wahrscheinlich ist dabei, dass die Sinterkorundkörner an dem Spanbildungsprozess zwar teilnehmen, die finale Oberflächenbeschaffenheit jedoch primär durch die Schmelzkorundkörner generiert wird. Dessen Anteil nimmt mit der Steigerung des Sinterkorundanteiles ab, was zur Reduktion aktiver Schneiden, den höheren Einzelkornspannungsdicken h_{cu} und damit zur Verschlechterung der Oberflächenkennwerte führt.

7 Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen



Schleifprozess
Längs-Umfangs-Planschleifen
Schleifstellgrößen
 $v_s = 30,000$ m/s
 Q'_W variabel
 a_e variabel
 $v_f = 22,000$ m/min
 $a_p = 20,000$ mm
Gegenlauf
Trockenbearbeitung
Maschine
Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge
zylindrische Schleifscheibe
STELLA KERAMIK
300 x 30 x 127 mm³
Korngröße 20 Mesh
Anteil Sinterkorund
■ 0 %
□ 15 %
▣ 30 %
Kunstharzbindung
Härte Q (hochhart)
Struktur 4
Werkstück / Schiene
gerade Vignolschiene S49
VOESTALPINE AG
Stahl R260
 $l = 140$ mm
 $T_s = 20$ °C

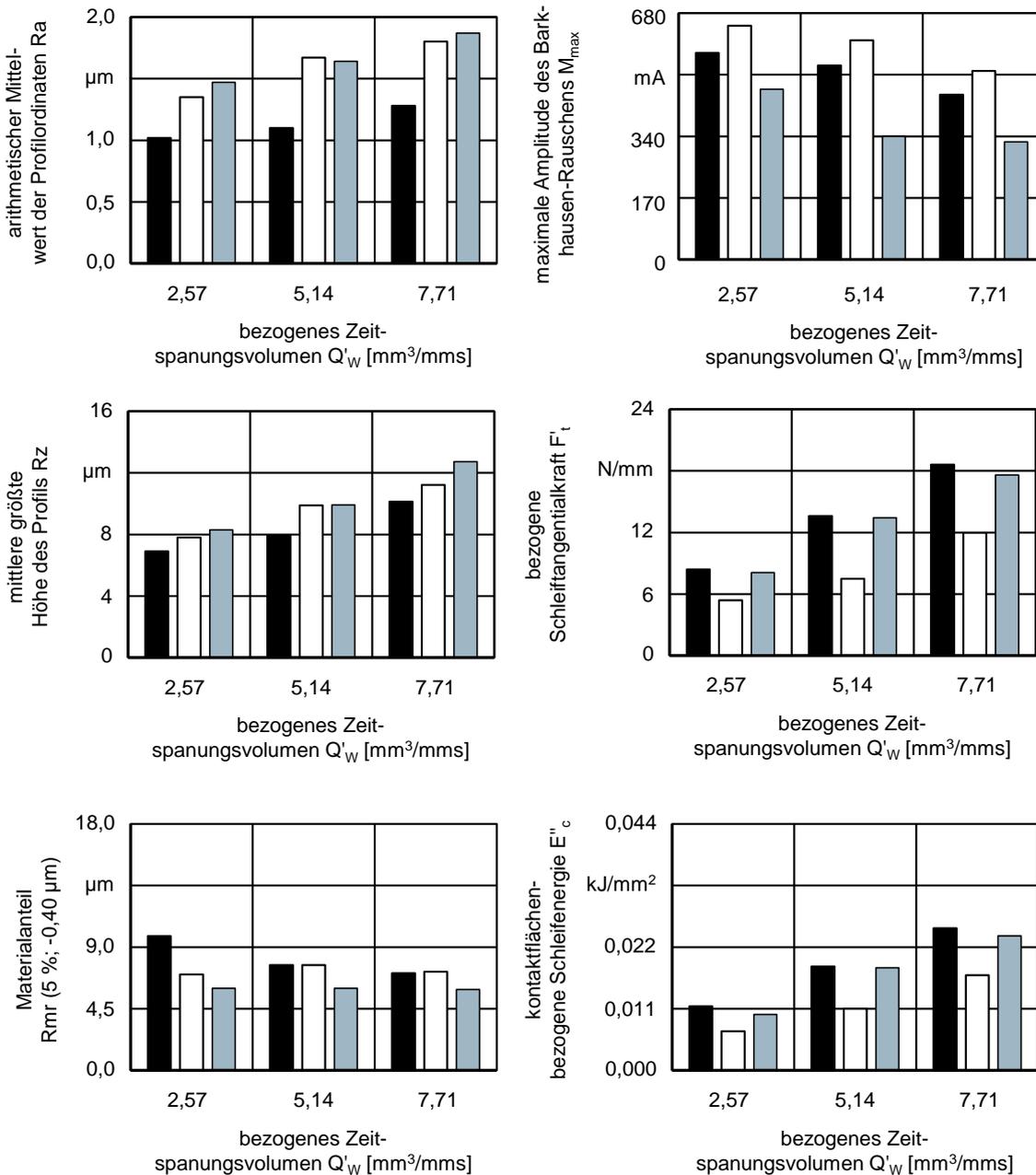


Bild 7-22: Einfluss des Sinterkorundanteils der Schleifscheiben in Kombination mit den Prozessstellgrößen auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte

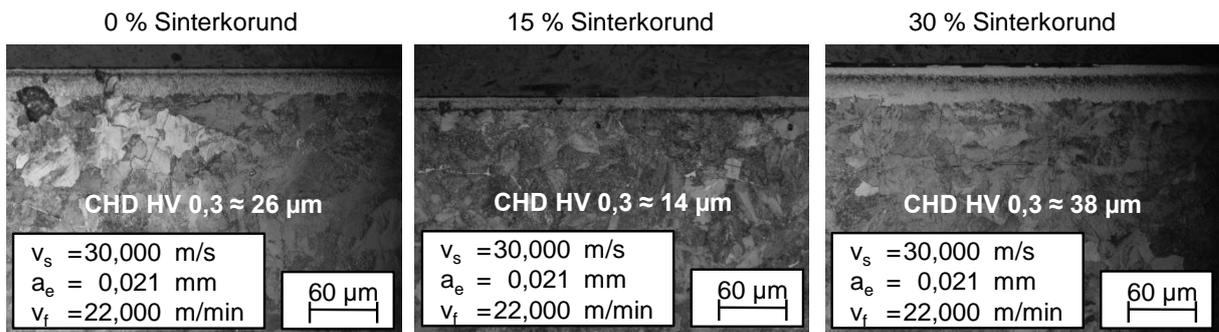


Bild 7-23: Einfluss des Sinterkorundanteils der Schleifwerkzeuge auf die Randzonenbeschaffenheit

Der Einfluss des Sinterkorundanteils auf die Randzonenbeschaffenheit der Schienen in Form der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} ist zwar eindeutig, jedoch nicht linear. Der Sinterkorundanteil von 15 % verursacht die mit Abstand geringsten Maße der Randzonenveränderung gegenüber den Schleifwerkzeugen mit einem Sinterkorundanteil von 30 % und den reinen Schmelzkorundwerkzeugen. Aufgezeigt werden kann dieses Phänomen beispielhaft an dem Schleifprozess mit einem bezogenen Zeitspannungsvolumen $Q'_w = 7,71$ mm³/mms. Dabei führt das Schleifwerkzeug mit einem 15 %-Anteil des Sinterkorundes zu Härtungstiefen der Randzone von CHD HV 0,3 ≈ 14 µm. Mit einer Steigerung des Sinterkorundanteils auf 30 % erfolgt eine Erhöhung des Maßes der Randzonenveränderung bis auf CHD HV 0,3 ≈ 38 µm, sodass mit dieser Werkzeugzusammensetzung die unter Verwendung der Schleifwerkzeuge aus reinem Schmelzkorund erzielten relativ hohen Maße der thermischen Randzonenveränderung CHD HV 0,3 ≈ 26 µm sogar übertroffen werden. Die Betrachtung der kontakflächenbezogenen Schleifenergien E''_c zeigt, dass diese bei dem Sinterkorundanteil von 15 % am geringsten ausfallen und eine direkte Korrelation zu dem Maß der thermischen Randzonenveränderung haben. Das Kornverhältnis von 85 % Schmelzkorund und 15 % Sinterkorund scheint daher für die untersuchten Bereiche der Werkzeug- und Prozessstellgrößen eine günstigste Kombination darstellen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Zusammensetzung von Schleifwerkzeugen einen signifikanten Einfluss auf die Bearbeitungsergebnisse, insbesondere die Randzonenbeschaffenheit, beim Schienenschleifen hat. Dabei stellen die Korngröße bzw. der mittlere Korndurchmesser d_{kg} sowie der Sinterkorundanteil die Werkzeugstellgrößen mit höherer Signifikanz hinsichtlich des Einflusses auf das Maß der Randzonenveränderung dar. Der Einfluss der Struktur scheint für den untersuchten Stellgrößenbereich wesentlich geringer. Unabhängig von der Werkzeugspezifikation können die in Kapiteln 7.1 und 7.2 identifizierten Zusammenhänge zwischen dem bezogenen Zeitspannungsvolumen Q'_w unter variabler Zustellung a_e mit den Bearbeitungsergebnissen und Schleifkennwerten bestätigt werden. Für die Auslegung der Schienenschleifprozesse kann grundsätzlich empfohlen werden, nicht die Schleifwerkzeuge mit den möglichst größten mittleren Korndurchmessern d_{kg} einzusetzen, da diese aufgrund hoher Energien für die Spanabtrennung für eine zusätzliche Wärmeentwicklung im Prozess sorgen können. Auch wenn die Sinterkorundwerkzeuge gegenüber den reinen Schmelzkorundwerkzeugen teurer sind, können durch das Zusetzen des Sinterkorundes von etwa 15 % die Zerspanbedingungen verbessert und dadurch höhere Bearbeitungsqualitäten erzielt werden.

7.5 Hochleistungsschleifbearbeitung

Aufgrund des Kostendruckes sowie einer großen Gesamtlänge des Schienennetzes besteht ein großer Bedarf zur Realisierung einer Hochleistungsschleifbearbeitung beim Schienenschleifen. Die Steigerung des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_W kann zum einen durch die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit v_f , die im Fall des Schienenschleifens der Überfahrgeschwindigkeit der Schleifvorrichtung bzw. des -zuges entspricht, realisiert werden. Eine weitere Möglichkeit zur gesteigerten Bearbeitungsproduktivität zu gelangen, stellt die Steigerung der Zustellung a_e dar. Es wird daher eine separate Analyse des Einflusses erhöhter Werte der Vorschubgeschwindigkeit bis $v_f = 67$ m/min und Zustellung bis $a_e = 0,063$ mm auf die Bearbeitungsergebnisse und Schleifkennwerte beim Schienenschleifen durchgeführt. Hierbei werden bezogene Zeitspannungsvolumina bis $Q'_W = 23,13$ mm³/mms abgebildet.

In Bild 7-24 ist der Einfluss der erhöhten bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_W unter Variation der Zustellung a_e auf die Bearbeitungsergebnisse arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten R_a , mittlere größte Höhe des Profils R_z , Materialanteil R_{mr} (5 %; - 0,4 μ m), maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} sowie der Prozesskennwerte bezogene Schleiftangentiale F'_t und kontakflächenbezogene Schleifenergie E''_c gezeigt. Bild 12-23 zeigt des Weiteren den Einfluss der erhöhten bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_W unter Variation der Zustellung a_e auf weitere Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , bezogene Schleifnormalkraft F'_n , kontakflächenbezogene Schleifleistung P''_c und spezifische Schleifenergie e_c . In den Graphen entsprechen dabei die ersten drei Datenpunkte stets den im Kapitel 7.1 erlangten empirischen Messwerten. Die weiteren sechs Datenpunkte entsprechen erhöhten Werten der Zustellungen von $a_e = 0,028$ mm, 0,035 mm, 0,042 mm, 0,049 mm, 0,056 mm und 0,063 mm. In Verbindung mit der gleich bleibender Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 22$ m/min ergeben sich dadurch die bezogenen Zeitspannungsvolumina $Q'_W = 10,28$ mm³/mms, 12,85 mm³/mms, 15,42 mm³/mms, 17,99 mm³/mms, 20,56 mm³/mms und 23,13 mm³/mms.

Mit der Steigerung der Zustellung a_e erfolgt eine kontinuierliche Erhöhung des Mittelwertes der Profilordinaten R_a . Dabei steigt der R_a -Wert von $R_a \approx 1$ μ m bei $Q'_W = 2,57$ mm³/mms auf $R_a = 1,85$ μ m bei dem höchsten bezogenen Zeitspannungsvolumen $Q'_W = 23,13$ mm³/mms. Die mittlere größte Höhe des Profils R_z nimmt mit der Steigerung der Zustellung a_e ebenfalls zu. Insbesondere im Bereich bezogener Zeitspannungsvolumina von $2,57$ mm³/mms $\leq Q'_W \leq 10,28$ mm³/mms ist der Zuwachs der R_z -Werte erheblich. Außer der geringen Rauheitskennwerten liefern die geringen Zustellungen a_e hohe Werte des Materialanteils R_{mr} (5 %; - 0,4 μ m). Diese sind bei der Zustellung $a_e = 0,007$ μ m mit Abstand am höchsten. Im Bereich der bezogenen Zeitspannungsvolumina $7,71$ mm³/mms $\leq Q'_W \leq 23,13$ mm³/mms ist der Einfluss der Zustellung a_e auf die Veränderung des Materialanteils R_{mr} (5 %; - 0,4 μ m) zwar vorhanden, jedoch ist dieser wesentlich geringer gegenüber dem Bereich der bezogenen Zeitspannungsvolumina $2,57$ mm³/mms $\leq Q'_W \leq 7,71$ mm³/mms. Die kontinuierliche Verschlechterung der Oberflächenkennwerte der Schienen mit der Erhöhung der Zustellung a_e ist durch die Steigerung der Einzelspannungsdicken h_{cu} zu erklären.

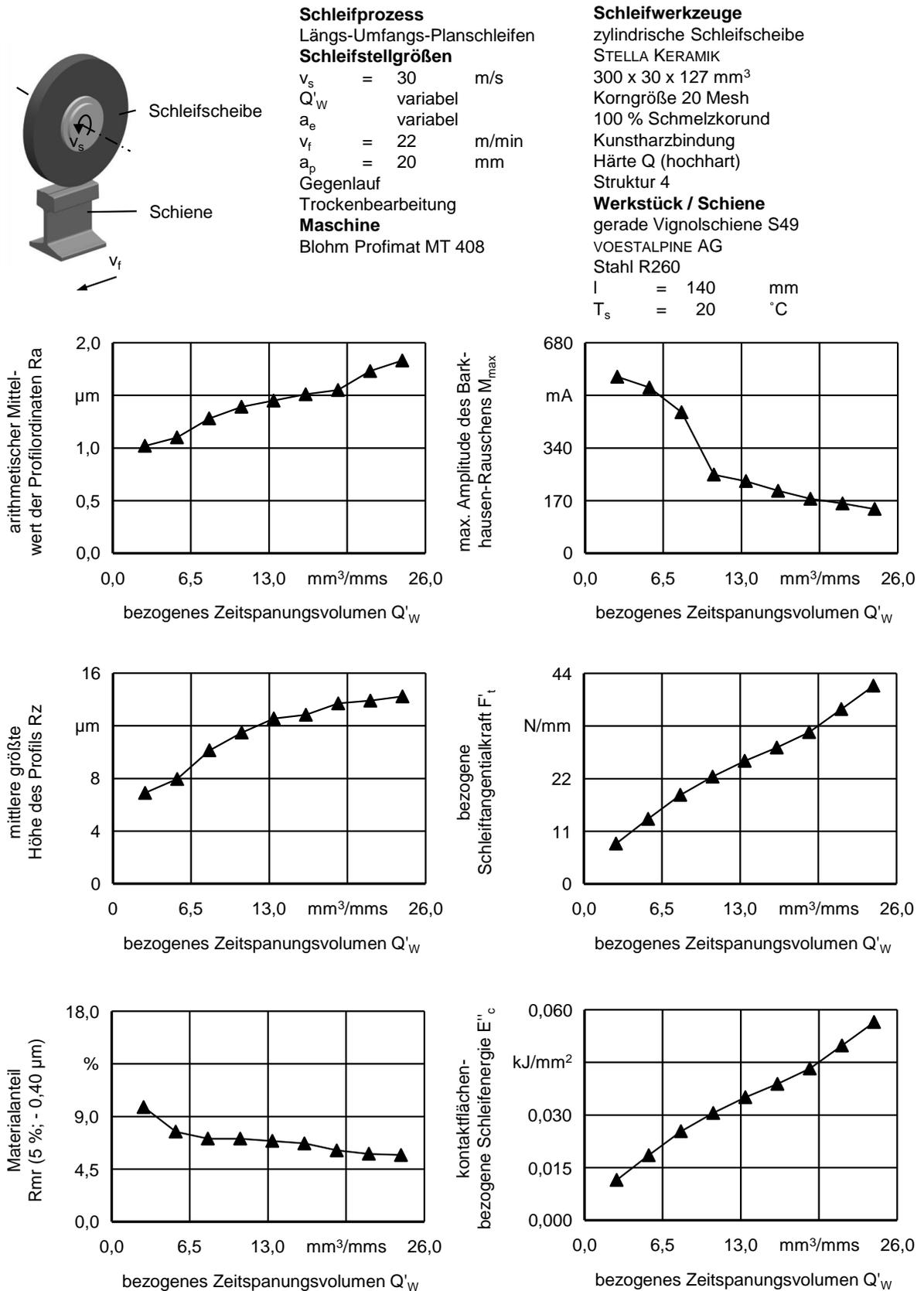


Bild 7-24: Einfluss der erhöhten bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_W unter Variation der Zustellung a_e auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte

Die systematische Erhöhung des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_W über die Zustellung a_e hat eine kontinuierliche Erhöhung des Maßes der thermischen Randzonenveränderung zur Folge. Dies ist anhand abnehmender Werte der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} sowie steigender Werte der Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} feststellbar. Auch die exemplarischen Analysen der Härtungstiefe der Schienenrandzonen, Bild 7-25, bestätigen die Aussagekraft der makromagnetischen Messungen. Während bei der geringsten eingesetzten Zustellung $a_e = 0,007 \mu\text{m}$ die Randzone nur minimal verändert wird (CHD HV 0,3 $\approx 7 \mu\text{m}$), werden bei der höchsten Zustellung $a_e = 0,063 \mu\text{m}$ massive thermische Randzonenveränderungen mit Härtungstiefen von CHD HV 0,3 $\approx 93 \mu\text{m}$ verursacht. Die kontaktfächenbezogenen Schleifenergien E''_c nehmen im untersuchten Bereich der bezogenen Zeitspannungsvolumina $2,57 \text{ mm}^3/\text{mms} \leq Q'_W \leq 23,13 \text{ mm}^3/\text{mms}$ um bis zu 300 % zu. Die klaren Korrelationen zwischen dem Maß der thermischen Randzonenveränderung mit den bezogenen Schleiftangentialkräften F'_t sowie den kontaktfächenbezogenen Schleifenergien E''_c lassen darauf schließen, dass die Steigerung des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_W über die Zustellung a_e einen enormen Anstieg der Prozessenergie zur Spanumformung und -abtrennung verursacht. Die hierdurch induzierte Wärme fließt zum großen Teil in die Schiene hinein und beeinflusst das Bearbeitungsergebnis nennenswert.

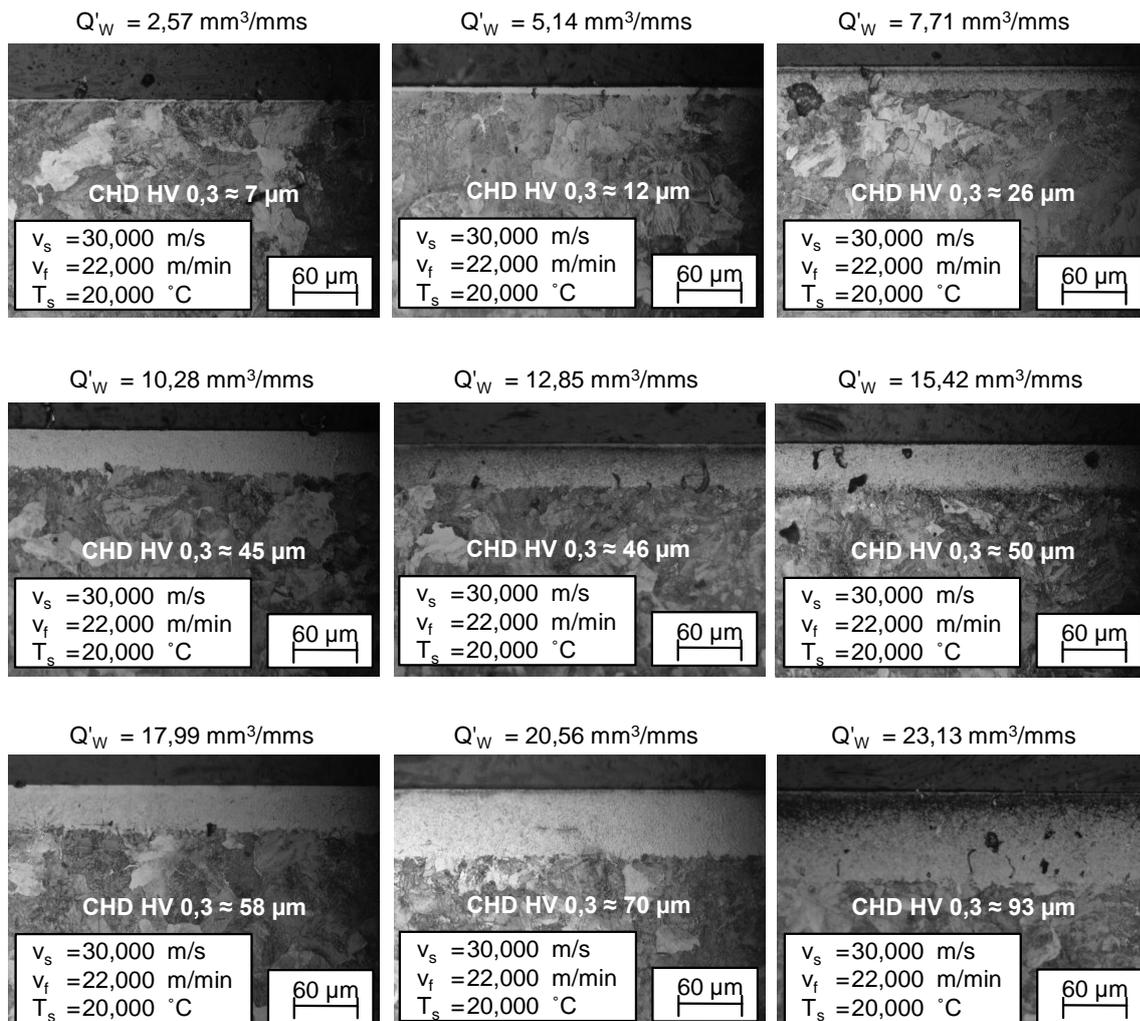


Bild 7-25: Einfluss erhöhter bezogener Zeitspannungsvolumina Q'_W unter Variation der Zustellung a_e auf die Schienenrandzonenbeschaffenheit

In [Bild 7-26](#) ist der Einfluss erhöhter bezogener Zeitspannungsvolumina Q'_w unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit v_f auf die Bearbeitungsergebnisse arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten R_a , mittlere größte Höhe des Profils R_z , Materialanteil R_{mr} (5 %; - 0,4 μm) und maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} sowie die Prozesskennwerte bezogene Schleiftangentialkraft F'_t und kontaktfächenbezogene Schleifenergie E''_c gezeigt. Der Einfluss der erhöhten bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_w unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit v_f auf die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , bezogene Schleifnormalkraft F'_n , kontaktfächenbezogene Schleifleistung P''_c und spezifische Schleifenergie e_c kann [Bild 12-24](#) entnommen werden. In den Graphen entsprechen wiederum jeweils die ersten drei Datenpunkte den im Kapitel 7.1 untersuchten Kombinationen der Schleifstellgrößen. Die weiteren sechs Datenpunkte entsprechen den erhöhten Werten der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 32 \text{ m/min}$, 37 m/min , 42 m/min , 47 m/min , 52 m/min und 57 m/min . In Verbindung mit der gleich bleibender Zustellung von $a_e = 0,007 \text{ mm}$ ergeben sich dadurch die bezogenen Zeitspannungsvolumina $Q'_w = 3,75 \text{ mm}^3/\text{mms}$, $4,34 \text{ mm}^3/\text{mms}$, $4,93 \text{ mm}^3/\text{mms}$, $5,52 \text{ mm}^3/\text{mms}$, $6,14 \text{ mm}^3/\text{mms}$ und $6,70 \text{ mm}^3/\text{mms}$. In [Bild 7-27](#) sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen erzeugter Randzonen samt der Nennungen der erzielten Härtungstiefen CHD HV 0,3 gezeigt.

Mit einer Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit v_f erfolgt eine Erhöhung der Rauheitskennwerte arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten R_a und mittlere größte Höhe des Profils R_z . Dies ist auf eine kontinuierliche Zunahme der Einzelkornspannungsdicken h_{cu} zurückzuführen. Beispielsweise wachsen die R_a -Werte von $R_a = 0,95 \mu\text{m}$ bei der geringsten getesteten Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 17 \text{ m/min}$ auf $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ bei der höchsten eingesetzten Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 57 \text{ m/min}$, was eine Zunahme von etwa 60 % ergibt. Jedoch bleiben auch die bei den hohen Vorschubgeschwindigkeiten v_f erzielten Rauheitswerte R_a und R_z in einem relativ feinen Bereich deutlich unterhalb des Industriegrenzwertes von $R_a < 10 \mu\text{m}$. Auch bei der Betrachtung des Materialanteils R_{mr} (5 %; - 0,4 μm) ist eine kontinuierliche Verschlechterung der gemessenen Werte mit der Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit v_f festzustellen.

Während die Oberflächenkennwerte mit der Steigerung des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit v_f nahezu proportional korrelieren, sollen bei der Analyse des Einflusses auf die Schienenrandzonen zwei Bereiche der Vorschubgeschwindigkeiten v_f differenziert werden. Bei einer Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit im Bereich $17 \text{ mm/min} \leq v_f \leq 27 \text{ mm/min}$ erfolgt eine kontinuierliche Reduktion des Maßes der Randzonenveränderung, was aufgrund einer Steigerung der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens im Bereich $365 \text{ mA} \leq M_{\max} \leq 670 \text{ mA}$ sichtbar ist. Bei einer weiteren Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit im Bereich $27 \text{ mm/min} \leq v_f \leq 59 \text{ mm/min}$ nimmt das Maß der thermischen Randzonenveränderung langsam zu. Jedoch ist die maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens $M_{\max} = 540 \text{ mA}$ und die Härtungstiefe CHD HV 0,3 = $12 \mu\text{m}$ bei der höchsten getesteten Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 59 \text{ m/min}$ wesentlich geringer als diese Kenngrößen bei der geringsten eingesetzten Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 17 \text{ m/min}$ mit $M_{\max} = 410 \text{ mA}$ und CHD HV 0,3 = $41 \mu\text{m}$. Dies bestätigt die in den Voruntersuchungen identifizierte Erkenntnis über einen sehr großen thermischen Einfluss geringer Vorschubgeschwindigkeiten v_f auf die Schienenrandzone.

7 Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen

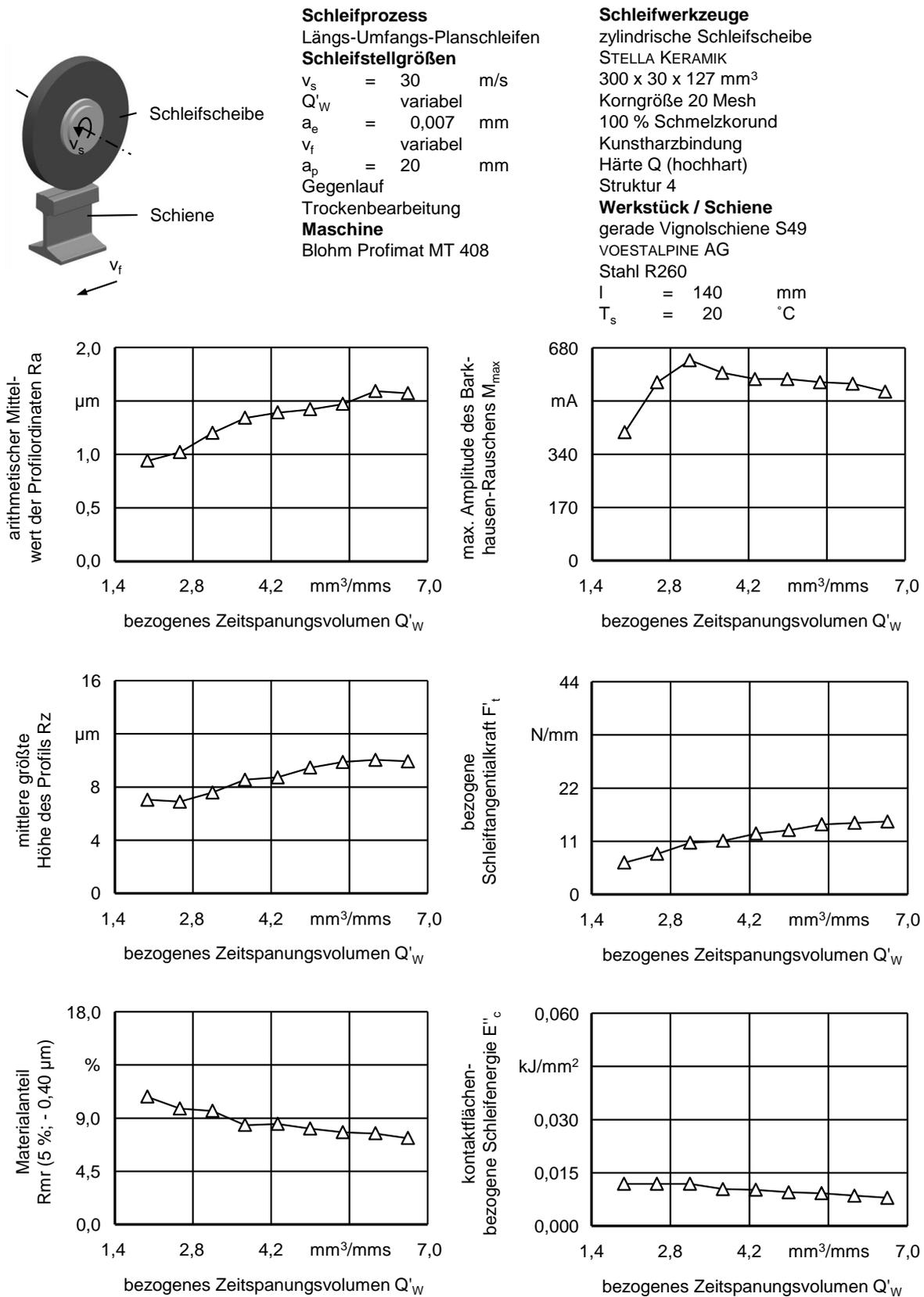


Bild 7-26: Einfluss der erhöhten bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_W unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit v_f auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte

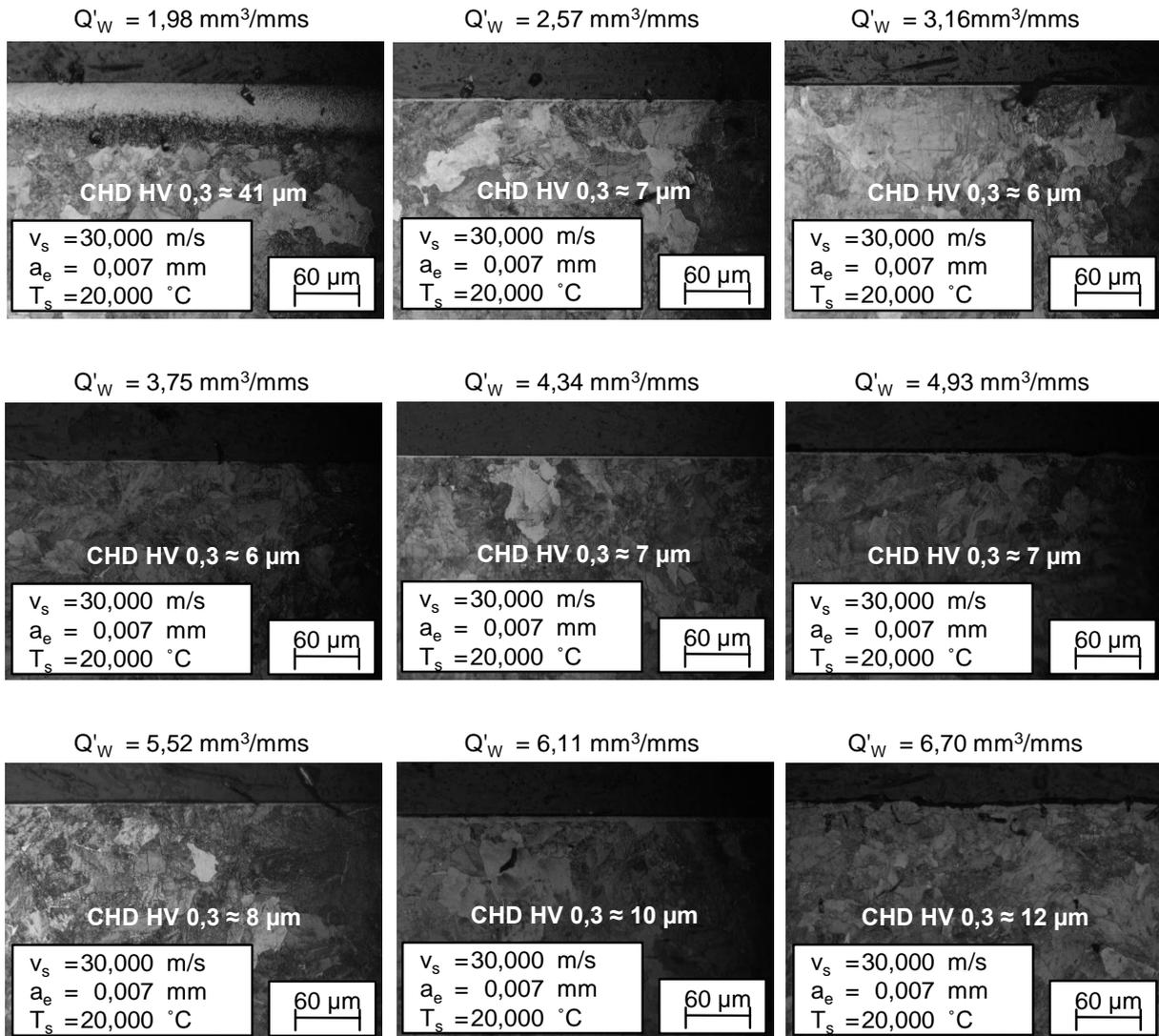


Bild 7-27: Einfluss der erhöhten bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_W unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit v_f auf die Schienenrandzonenbeschaffenheit

Bei der Betrachtung des Einflusses gesteigerter Werte des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_W über die Vorschubgeschwindigkeit v_f auf die Prozesskennwerte bezogene Schleiftangentialkraft F'_t und kontaktfächenbezogene Schleifenergie E''_c fällt auf, dass diese keine eindeutige Korrelationen mit den festgestellten Veränderungen der Schienenrandzone haben. Weiterhin ist eine unterschiedliche Entwicklung der beiden Kennwerte zu erwähnen. Mit der Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit v_f steigt die bezogene Schleiftangentialkraft F'_t aufgrund der gestiegenen Einzelkornspannungsdicken h_{cu} deutlich. Dabei nimmt die kontaktfächenbezogene Schleifenergie E''_c geringfügig, jedoch systematisch, ab, was durch eine kontinuierliche Reduktion der Schleifkontaktzeiten Δt verursacht wird.

Die Ergebnisse zeigen tendenziell erneut die Bedeutung der Schleifkontaktzeit Δt auf die Beeinflussung der Randzone der Schiene auf. Daraus lässt sich ableiten, dass eine schädigungsarme produktive Bearbeitung in erster Linie über einer Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit v_f und nicht über eine Erhöhung der Zustellung a_e umzusetzen ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei einer Hochleistungsschleifbearbeitung mit den gesteigerten Werten des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w sowohl die Zustellung a_e als auch die Vorschubgeschwindigkeit v_f einen Einfluss auf die Bearbeitungsergebnisse haben. Hinsichtlich der Wärmeentwicklung und des thermischen Einflusses auf die Schienenrandzone scheint die Vorschubgeschwindigkeit v_f weniger kritisch zu sein. Voraussetzung ist dabei, dass sehr langsame Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f < 17$ m/min vermieden werden, da dabei aufgrund der hohen Eingriffszeiten Δt in Kombination mit der Trockenbearbeitung eine erhöhte Energieentwicklung in der Schiene und ein hohes Maß der Randzonenveränderungen verursacht werden. Insbesondere bei halbautomatisierten Schleifvorrichtungen und Schleifzügen stellt die Vorschubgeschwindigkeit v_f die Hauptstellgröße dar, die zur Steigerung der Produktivität und Senkung der Kosten für die Schieneninstandhaltung genutzt werden kann. Es ist daher sinnvoll, zukünftig die Wissensbasis bzgl. des Einflusses der weiteren Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit $v_f > 59$ m/min bei den geringen Zustellungen $a_e \leq 0,014$ mm auf die Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen zu analysieren. Die Aussage über die sehr gute Korrelation zwischen der kontaktfächenbezogenen Schleifenergie E''_c mit dem Maß der thermischen Randzonenschädigung kann im Laufe von allen technologischen Untersuchungen zum Schienenschleifen zum großen Teil verifiziert werden. Dieser Kennwert ist somit zur Verwendung als prozessseitiger Indikator des Maßes der thermischen Randzonenveränderung auch beim Schienenschleifen ohne KSS-Nutzung gut geeignet.

7.6 Fazit

Im Kapitel 7 wird eine umfangreiche Grundlagenkenntnisbasis erarbeitet, die einem besseren technologischen Verständnis des Schienenschleifens dienen soll. Der Fokus liegt dabei auf der Analyse des Einflusses prozess- und werkzeugseitiger Stellgrößen in Kombination mit variablen Temperaturen der Schiene und Schmierungszenarien. Die Bewertung erfolgt anhand vordefinierter Kennzahlen der Oberflächen- und Randzonenkenngrößen. Die Temperatur der Schiene T_s beeinflusst die Zerspanbarkeit des Schienenstahls R260 deutlich. Dies führt zu einer nicht konstanten Wärmeumsetzung in der Schiene und folglich zu variablen Bearbeitungsergebnissen. Die Steigerung der Schientemperatur führt zur Reduktion der im Prozess erzeugten Wärme und Verbesserung des Bearbeitungsergebnisses. Zur Sicherstellung einer prozesssicheren Schienenschleifbearbeitung bei variablen Temperaturen der Schiene sollen beim Schienenschleifen unterschiedliche Zustellungen a_e eingesetzt werden. Die Analyse von drei Schmierzenarien beim Schienenschleifen hat gezeigt, dass dabei teilweise große Unterschiede in den Bearbeitungsergebnissen erzielt werden können. Mit der Steigerung des Volumenstroms hat das Maß der thermischen Randzonenveränderung systematisch abgenommen. Das Schmierzenario der Kühlschmierstoffbenetzung des Schleifwerkzeuges und der Schiene bietet aufgrund einer einfachen technischen Realisierbarkeit in Kombination mit technologischen Vorteilen gegenüber einer Trockenbearbeitung großes Potenzial für den Einsatz in den Schienenschleifsystemen an. Ferner kann der Sinterkorundanteil in den Schleifwerkzeugen eine spürbare Reduktion der Energieentwicklung und folglich des Maßes thermischer Randzonenveränderung verursachen. Für einen Einsatz zum Schienenschleifen bei einer Trockenbearbeitung wird der Sinterkorundanteil von 15 % empfohlen. Die Bearbeitungsproduktivität beim Schienenschleifen kann durch eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit v_f erhöht werden, ohne dabei die Bearbeitungsergebnisse sig-

nifikant zu verschlechtern. Erhöhte Werte der Zustellung von $a_e > 0,014$ mm sind hingegen zu vermeiden, da diese im untersuchten Bereich der prozess- und werkzeugseitigen Stellgrößen zu massiven Randzonenveränderungen führen. Zur weiteren Steigerung der Bearbeitungsproduktivität, insbesondere auf den ausgelasteten Schienenstrecken, sind zweistufigen Schienenschleifprozesse denkbar. Dabei können mehrere Schleifscheiben hintereinander eingesetzt werden, bei welchen die abfallenden Zustellungen a_e programmiert sind.

8 Tribologisches Einsatzverhalten von geschliffenen Schienen

Als tribologisch hoch beanspruchte Bauteile sollen Schienen einen hinreichend hohen Verschleißwiderstand haben, damit eine hohe Lebensdauer und die Verkehrsmittelsicherheit gewährleistet werden können. Durch das Schienenschleifen als Endbearbeitungsverfahren werden die finalen Oberflächen- und Randzoneneigenschaften der Schienenfahrfläche hergestellt, die für das nachfolgende Verschleißverhalten der Schiene ausschlaggebend sind. Im Kapitel 7 wird gezeigt, dass infolge des Schienenschleifens martensitische Aufhärtungen der Randzone und die sogenannten white etching layers (WEL) induziert werden können. Die WEL bilden sich durch Zerstörung der Zementitlamellen und die Diffusion des Kohlenstoffes in die ferritische Matrix. Die somit entstandene martensitische Schicht hat mit bis zu bis HV 0,3 = 1200 eine deutlich höhere Härte, als das Gefüge des Basismaterials. Einzelnen Literaturquellen kann entnommen werden, dass trotz der hohen Härte das Verschleißverhalten der WEL aufweisenden Bauteile tendenziell schlechter ist im Vergleich zu Bauteilen mit einer nicht veränderten Struktur der Randzonen. Dies ist vor allem auf die Zugspannungen zwischen den WEL und dem Substrat zurückzuführen, die zur Induktion von Mikrorissen führen können. Bei einer weiteren tribologischen Belastung solcher Randschichten wachsen die Mikrorisse in das Grundgefüge hinein, verbinden sich zu Rissnetzwerken und verursachen schließlich Makrodefekte bis hin Materialausbröckelungen aus der Schienenoberfläche [EGL04]. Im Kapitel 8 wird eine Qualifizierung des Einsatzverhaltens der durch das Schienenschleifen in unterschiedlichem Maß veränderten Randzonen hinsichtlich des Verschleißwiderstandes vorgenommen. Das Vorgehen berücksichtigt die Durchführung von tribologischen Untersuchungen im skalierten Modus unter Verwendung mehrerer, aus den geschliffenen Schienensegmenten ausgeschnittenen Proben.

Wie die meisten metallischen Werkstoffe sind die Schienenwerkstoffe empfindlich gegenüber zyklischen Belastungen, die zur Entwicklung der Ermüdungsvorgänge und schließlich zum Schienenverschleiß führen. Nach [DIN 50320] wird Verschleiß als fortschreitender Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, definiert. Die vorherrschende Reibungsart beim Rad/Schiene-Kontakt ist die Roll- bzw. Wälzreibung, wobei die Relativbewegung zwischen den Kontaktpartnern kinematisch auf Zykloiden stattfindet. Beim Erreichen eines Grenzwertes der Normal- und Tangentialspannungen kommt es zu plastischen Deformationen auf und unterhalb der Bauteiloberfläche. Die Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene ist von der Position der beiden Komponenten zueinander sowie den dynamischen Kräften der Kontaktpartner zueinander und der mikroskopischen Oberflächengestalt, der Rauheit, abhängig. Dabei kann es zu erheblichem plastischen Scheren parallel zur Bauteiloberfläche kommen.

Die tribologischen Untersuchungen sollen zunächst unter Verwendung zahlreicher Proben im skalierten Modus durchgeführt werden. Anschließend sollen die somit erzielten Ergebnisse exemplarisch bei einem realen Rad/Schiene-Kontakt verifiziert werden, Kapitel 9. Im Vorfeld der Auslegung entsprechender Versuchsumgebungen erfolgt die Identifikation und Bewertung der geeigneten Konzepte dafür. Unter Berücksichtigung der im Kapitel 2.1.4 aufgelisteten Erkenntnisse wird deutlich, dass insgesamt drei gängige kinematische Konzepte zur Analyse des tribologischen Einsatzverhaltens der Schienen in Frage kommen:

- Scheibe/Scheibe,
- Rad/Scheibe,
- Rad/Schiene.

Diese werden im Folgenden einzeln vorgestellt und hinsichtlich der Eignung für die geplanten Versuchsumgebungen bewertet.

Scheibe/Scheibe

Dieses Konzept dient einer skalierten Abbildung der Bewegungsarten Gleiten, Rollen und Walzen im Rad/Schiene-Kontakt. Die Scheibe/Scheibe-Prüfung wird auch als Amsler-Verschleißtest bezeichnet [TAP05]. Dabei werden typischerweise zwei Scheiben mit einer Breite von $b = 10$ mm und einem Durchmesser von $d = 40$ mm aneinander gepresst. Die Mantelflächen der Scheiben können beliebige Geometrie aufweisen. Das Reibmoment wird kontinuierlich aufgezeichnet. Mit dem einschaltbaren Exzenter kann der Rotationsbewegung eine pulsierende radiale Belastung, ein schlagartiges Abheben, überlagert werden. Ein zweiter Exzenter ermöglicht eine periodische axiale oszillierende Bewegung des oberen Probekörpers. Die Verschleißbestimmung erfolgt durch die Feststellung der Gewichts- bzw. der Durchmesserunterschieden im verschlissenen Zustand gegenüber dem Ausgangszustand.

Rad/Scheibe

Bei den Rad/Scheibe-Versuchsständen wird die Schiene durch eine rotationssymmetrische Scheibe ersetzt, die am Rand ein Schienenkopprofil aufweist. Das Rad und die Scheibe rollen entweder in derselben Ebene oder senkrecht zueinander ab. Damit kann das Laufverhalten des Rades auf gerader Schiene modelliert werden. Die Schienenscheiben sind drehstarr miteinander verbunden und werden zur Rotation von einem Elektromotor angetrieben. Der Antrieb vom Radsatz erfolgt passiv über die Schienenscheiben, wobei eine Verzögerung über pneumatische Scheibenbremsen an der Radsatzachse ermöglicht werden kann. Vorteilhaft ist dabei der endlose Lauf, mit dem Beschleunigung, Leerlauf und Bremsen in sämtlichen Bereichen nachgestellt werden können. Durch den Rundlauf ergeben sich Laufruhe und ein niedriger Energieverbrauch des Versuchsstandes. Je größer der Radius der Scheibe, desto höher die Vergleichbarkeit zu einer realen Schiene [THO03]. Zahlreiche Variationen des Rad/Scheibe-Versuchsstandes sind dabei bekannt. Grundsätzlich ist zu sagen, dass aufgrund der Rotationsbewegung kaum Schwingungen entstehen und des Weiteren hohe Drehzahlen möglich sind, was viele Lastwechsel pro Zeiteinheit erlaubt. Zu den Nachteilen zählen die begrenzt realistische Abbildung realer Spannungsverteilungen aufgrund der gekrümmten Oberfläche der Schienenscheibe sowie die Tatsache, dass der Lauf in engen Schienenbögen nicht abgebildet werden kann.

Rad/Schiene

Bei den Rad/Schiene-Versuchsständen werden reale, industrieübliche Schienen unskaliert eingesetzt. Die Schiene ist entweder einzeln auf einer Trägerkonstruktion gestützt, auf dem ein einzelnes Rad abrollt, oder wird in größeren Anlagen in einem Gleis, bzw. Oberbau verbaut, auf dem Radsätze und Drehgestelle verwendet werden. Bei diesem Konzept der Tribologieversuchsstände steht die Radachse fest. Das Rad wird axial angetrieben und wälzt auf der geraden Schiene, die in Längsrichtung verschiebbar ist und ebenfalls angetrieben wird. Mit einer hydraulischen Pressvorrichtung werden die Lateral- und Vertikalkräfte erzeugt und die Schiene horizontal in Laufrichtung verschoben. Der Einlauf in kleine Bögen wird durch

eine angestellte Laufrichtung des Rades zur Schiene abgebildet. Da jedoch das Rad keine echte Kurve fährt und sich relativ nur in der Längsrichtung zur Schiene bewegt, tritt geringer Bohrschlupf als in der Realität auf. Dieses Konzept bietet ein hohes Maß an Flexibilität, da Rad und Schiene leicht durch andere Variationen ersetzt werden können und nahezu alle Einflüsse auf die Kontaktzone einstellbar sind [STO07].

Bei den vorgenommenen tribologischen Untersuchungen im skalierten Modus können versuchsspezifisch die prismatischen Proben eingesetzt werden, die aus den plangeschliffenen Schienenoberflächen ausgeschnitten sind. Hierfür wird auf Basis des vorgestellten Scheibe/Scheibe-Konzeptes ein Tribologieversuchsstand nach dem Schema Zylinder/Platte in Zusammenarbeit mit dem Partnerinstitut INSTITUT FÜR MECHANIK UND MASCHINENBAU (MMI) der NATIONALEN TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DER UKRAINE NTUU „KPI“ entwickelt. Die tribologischen Untersuchungen zur Charakterisierung des Werkstoffermüdungsverhaltens unter realen Bedingungen erfolgen auf einem Linearprüfstand zur Abbildung des 1:1-Rad/Schiene-Kontaktes von der Firma DEUTSCHE BAHN SYSTEMTECHNIK GMBH, dessen Aufbau und Funktionalität dem oben dargestellten Konzept eines Rad/Schiene-Versuchsstandes ähnelt.

Als Grundlage zur Entwicklung der Versuchsumgebung zur skalierten Abbildung des Rad/Schiene-Kontaktes dient der Scheibe/Scheibe-Versuchsstand des MMI mit institutsinterner Bezeichnung M-22M, Bild 8-1. Bei der Einrichtung des Versuchstandes werden die Anforderungen an den Aufbau und die Durchführung der tribologischen Untersuchungen, die durch die GESELLSCHAFT FÜR TRIBOLOGIE, Aachen, Deutschland, spezifiziert sind, beachtet [GFT 02]. Dabei ist die Probe in einer speziell gefertigten metallischen Aufnahme fest gespannt. Der zylindrische Gegenkörper ist auf einer Welle fixiert. In den Versuchsstand sind zwei Exzenter eingebaut, die sind zum einen einer Gewährleistung der pulsierenden Belastung in radialer Richtung und zum anderen einer Realisierung des pulsierenden Hin- und Herschiebens des Gegenkörpers dienen. Der Versuchsstand M-22M ermöglicht die vordefinierte Einstellung der Last bzw. Anpresskräfte im Bereich $F_a = 100 - 1000 \text{ N}$ sowie Gleitgeschwindigkeiten im Bereich $v_g = 0,5 - 6 \text{ m/s}$. Vor und nach den tribologischen Untersuchungen erfolgt die Aufnahme der Reibungskoeffizienten μ , damit Nachweise über konstante Versuchsbedingungen während der Versuche gegeben sind. Weiterhin wird das Reibmoment kontinuierlich aufgezeichnet. Ferner ist im Versuchsstand eine Überwachung der Normalkraft N mittels eingebauter Dehnungsmessstreifen realisiert.

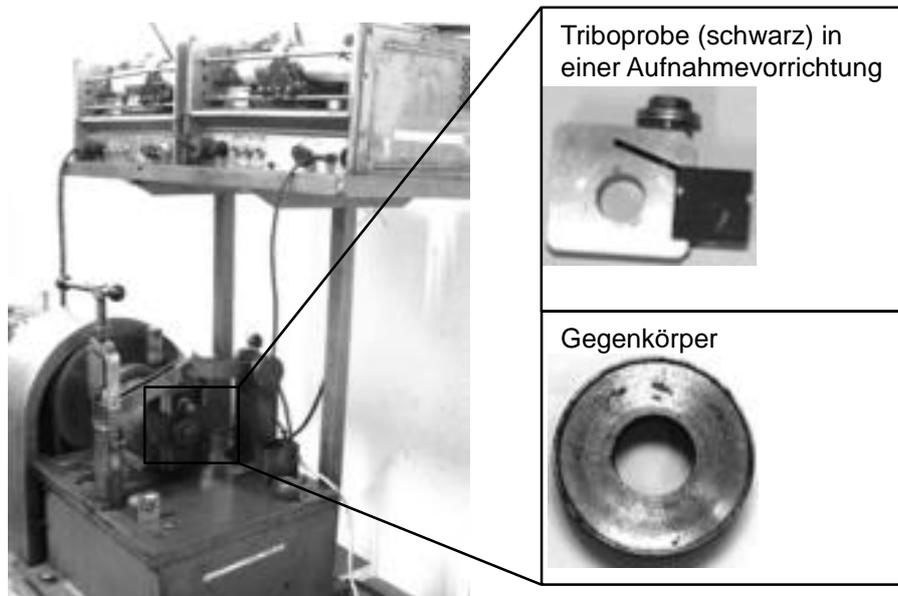


Bild 8-1: Tribologieversuchsstand Scheibe/Oberfläche M 22 der NTUU „KPI“ für die skalierte Untersuchung des Rad/Schiene-Kontaktes

Als Prüflinge kommen prismatische Proben der Abmessungen $10 \times 10 \times 20 \text{ mm}^3$ zum Einsatz, die mithilfe des Drahterodierens aus den geschliffenen Schienensegmenten ausgetrennt werden. Als Gegenkörper kommen zylindrische Stahlrohlinge der Fa. HANS-ERICH GEMMEL & CO. GMBH, Berlin, Deutschland, zum Einsatz, deren Werkstoff hinsichtlich der Materialeigenschaften dem Radstahl entspricht. Zur Steigerung des Verschleißwiderstandes der Gegenkörper wird an diesen eine Oberflächenverfestigung mittels Kugelstrahlen durchgeführt. Dies ist insofern notwendig, als dass der Verschleiß der Gegenkörper keine Auswirkung auf die Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen ausübt. Gegenüber dem Verschleiß der Proben werden nur sehr geringe Verschleißraten der Gegenkörper identifiziert. Die tribologischen Untersuchungen werden unter Verwendung konstanter Reibungsstellgrößen Gleitgeschwindigkeiten $v_g = 6,0 \text{ m/s}$, Anpresskraft $F_a = 1.000 \text{ N}$ und Belastungszeit $t = 6.000 \text{ s}$ durchgeführt. Bei den tribologischen Untersuchungen werden moderate Schmiermengen (Wasser) eingesetzt. Die Schmiermengen sowie die Belastungszeiten wurden im Rahmen der Vorversuche definiert und bleiben für alle Proben konstant. Die kinematische Realisierung sowie die Geometrie der Proben und Gegenkörpern sind in [Bild 8-2](#) dargestellt.

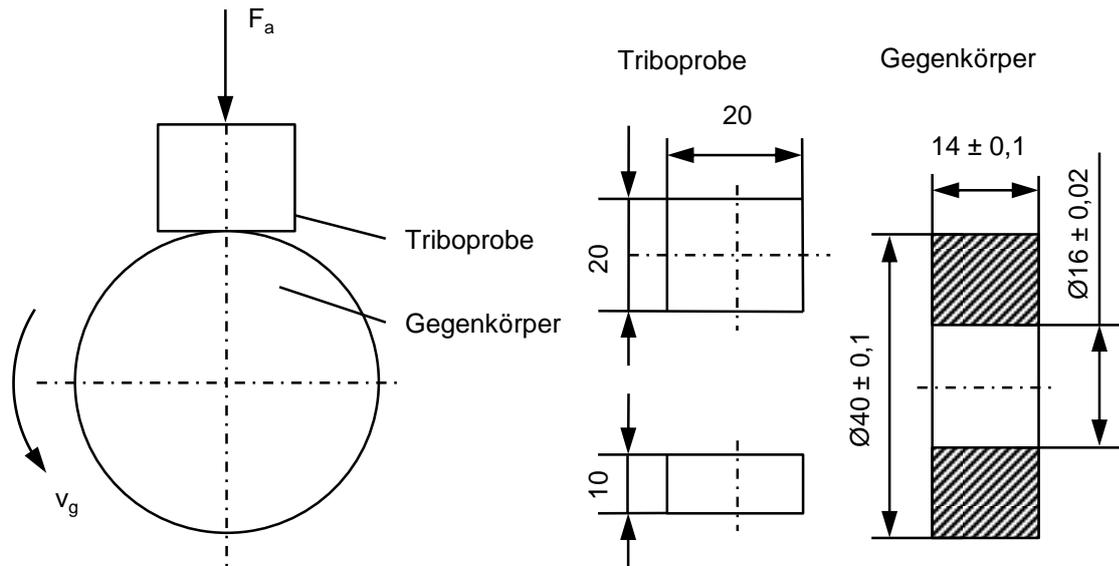


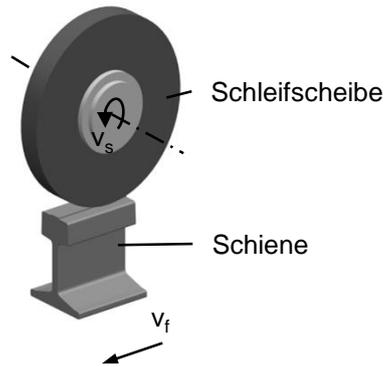
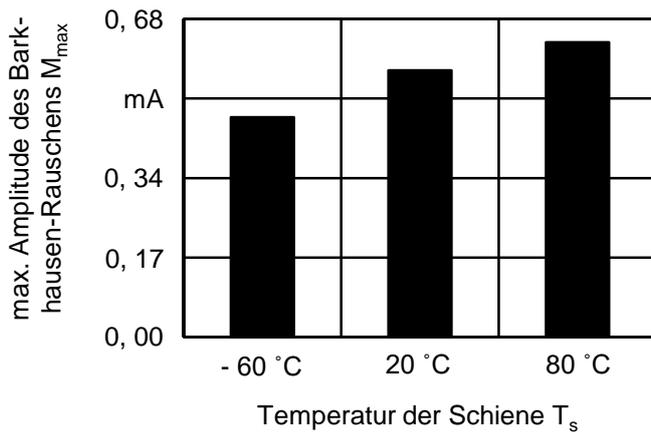
Bild 8-2: Kinematische Realisierung und Geometrie von Proben und Gegenkörpern für die skalierte Untersuchung des Rad/Schiene-Kontaktes

Der Verschleißzustand wird anhand der Messung des Masseverschleißes Δm mithilfe einer Feinwaage VLR 200 mit einer Messabweichung von 0,001 g systematisch überwacht. Zur zusätzlichen Analyse der belasteten Proben kommt das Lichtmikroskop BX51 der OLYMPUS OPTICAL CO. LTD, Shinjuku, Japan, zum Einsatz. Im Rahmen der tribologischen Untersuchungen im skalierten Modus werden insgesamt sieben Proben analysiert. Hierbei wird der Einfluss der Temperatur der Schiene beim Schleifen T_s , der Zustellung a_e und der Umfangsgeschwindigkeit v_s separat untersucht. Unter Berücksichtigung der statistischen Absicherung in Form von je zwei Wiederholversuchen beträgt der Gesamtversuchsaufwand 21 Versuche. Die Versuchsplanung für die tribologischen Untersuchungen im skalierten Modus kann [Tabelle 8-1](#) entnommen werden. Bei der Darstellung der Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen werden jeweils der Zustand der Randzone nach dem Schleifen in Form der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} und des damit einhergehenden Wertes der Härtungstiefe CHD HV 0,3, der durch den Tribotest generierte Masseverschleiß der Probe Δm und die kontaktflächenbezogene Schleifenergie E''_c systematisch gezeigt. Es wird vermutet, dass die kontaktflächenbezogene Schleifenergie E''_c mit dem Masseverschleiß der Schienenkörper korreliert und damit Rückschlüsse über die Liegedauer der Schienen nach einem Schleifvorgang ermöglichen kann.

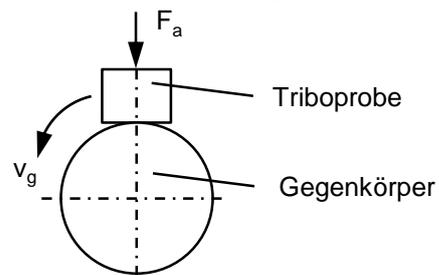
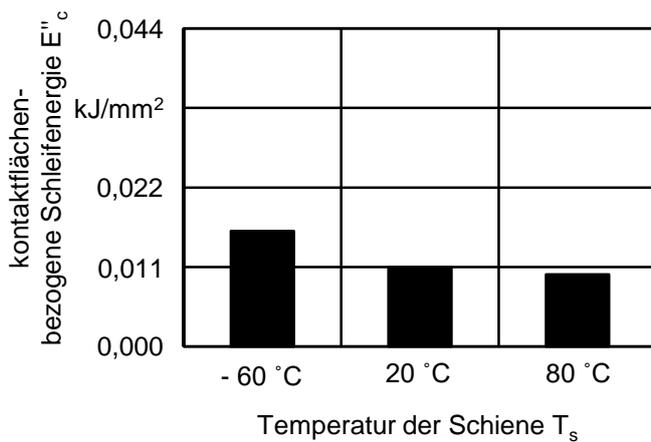
Tabelle 8-1: Versuchsplanung für die tribologischen Untersuchungen im skalierten Modus

Nummer der Probe	Temperatur der Schiene und Schleifstellgrößen				Tribologische Stellgrößen
	T_s , °C	a_e , mm	v_s , m/s	v_f , m/min	
1	- 60	0,007	30	22	$F_a = 1.000,0 \text{ N}$ $v_g = 6,0 \text{ m/s}$ $t_t = 6.000,0 \text{ s}$
2	20				
3	80				
5	20	0,014	40		
6		0,021			
8		0,007			
9		0,007		50	

In Bild 8-3 sind die Ergebnisse zum Einfluss der Schientemperatur T_s beim Schleifen auf die maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} und kontaktfächenbezogene Energie E''_c im Zusammenhang mit den nachfolgenden Tribotests dargestellt. Während die Temperaturen der Schienen beim Schleifen variierten, wurden die Tribotests bei einer konstanten Temperatur von $T_s = 20 \text{ °C}$ durchgeführt. Es ist zu verzeichnen, dass die Randzonen, die ein geringes Maß der Randzonenveränderung durch das Schleifen erfahren haben, einen geringeren Masseverschleiß Δm aufweisen. Während die bei der Schientemperatur $T_s = -60 \text{ °C}$ erzielte Härtungstiefe der Randzone CHD HV 0,3 = $24 \mu\text{m}$ zu einem Masseverschleiß von $\Delta m = 0,022 \text{ g}$ führt, reduziert sich der Masseverschleiß beim Übergang zur Schientemperatur von $T_s = 20 \text{ °C}$ schon um etwa 10 %, was mit einer Härtungstiefe der Randzone CHD HV 0,3 = $7 \mu\text{m}$ einhergeht. Gleichzeitig ist kaum ein Unterschied im Verschleißverhalten zwischen der Schienen mit einer Schientemperatur beim Schleifen von $T_s = 20 \text{ °C}$ und $T_s = 80 \text{ °C}$ zu verzeichnen, was mit der Tatsache korreliert, dass hierbei schon ein ähnliches Materialgefüge nach dem Schleifen vorlag. Demnach kann behauptet werden, dass bei höheren Temperaturen der Schiene T_s beim Schleifen ein verbessertes Einsatzverhalten der Schienen erzielt werden kann. Dies wird durch eine klare Korrelation des Verschleißverhaltens mit der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{\max} bestätigt, da die M_{\max} -Werte mit der festgestellten Reduktion des Masseverschleißes Δm abnehmen.



Schleifstellgrößen
 Blohm Profimat MT 408
 Längs-Umfangs-Planschleifen
 $v_s = 30,000$ m/s
 $a_e = 0,007$ mm
 $v_f = 22,000$ m/min
 $a_p = 20,000$ mm
 T_s variabel
 Gegenlauf
 Trockenbearbeitung



Tribologische Stellgrößen
 M-22 der NTUU "KPI"
 skaliertes Aufbau
 Scheibe/Oberfläche
 $F_a = 1.000,0$ N
 $v_g = 6,0$ m/s
 $\mu = 0,3$
 $t_t = 6.000,0$ s
 $T_t = 20,0$ °C

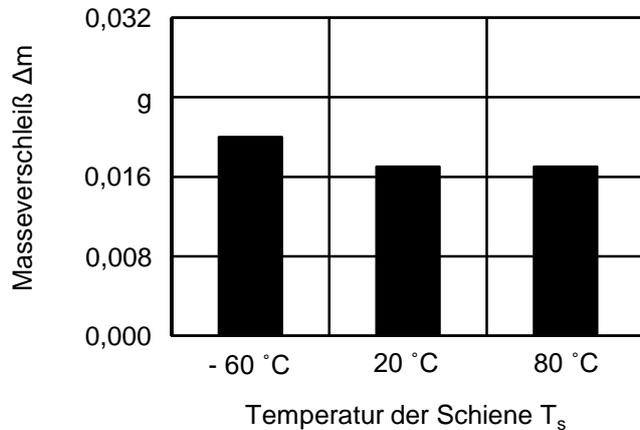


Bild 8-3: Zusammenhang der Schientemperatur T_s beim Schleifen in Kombination mit der kontakflächenbezogene Schleifenergie E_c und der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} mit dem Masseverschleiß Δm

In **Bild 8-4** ist der Einfluss der bei einer variablen Zustellung a_e erzeugten Randzonenbeschaffenheiten auf den Masseverschleiß Δm dargestellt. Mit einer Steigerung der Zustellung a_e erfolgt eine systematische Erhöhung der kontakflächenbezogenen Energie E_c sowie daraus resultierend der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} und des Masseverschleißes Δm . Dabei werden höhere Verschleißraten gegenüber den unter variablen Temperatur T_s geschliffenen Schienen beobachtet. Beim Übergang zwischen der Zustellung $a_e = 0,007$ mm zur Zustellung $a_e = 0,021$ mm ist eine Masseverschleißerhöhung um et-

wa 50 % von $\Delta m = 0,017$ g auf $\Delta m = 0,026$ g zu verzeichnen. Dies korreliert proportional mit der Veränderung der Härtungstiefen der Randzone CHD HV 0,3 und den kontaktfächenbezogenen Energie E''_c . Die festgestellten Unterschiede bei dem tribologischen Einsatzverhalten der Randzonen können gut über eine Anpassung der Zustellung a_e kompensiert werden.

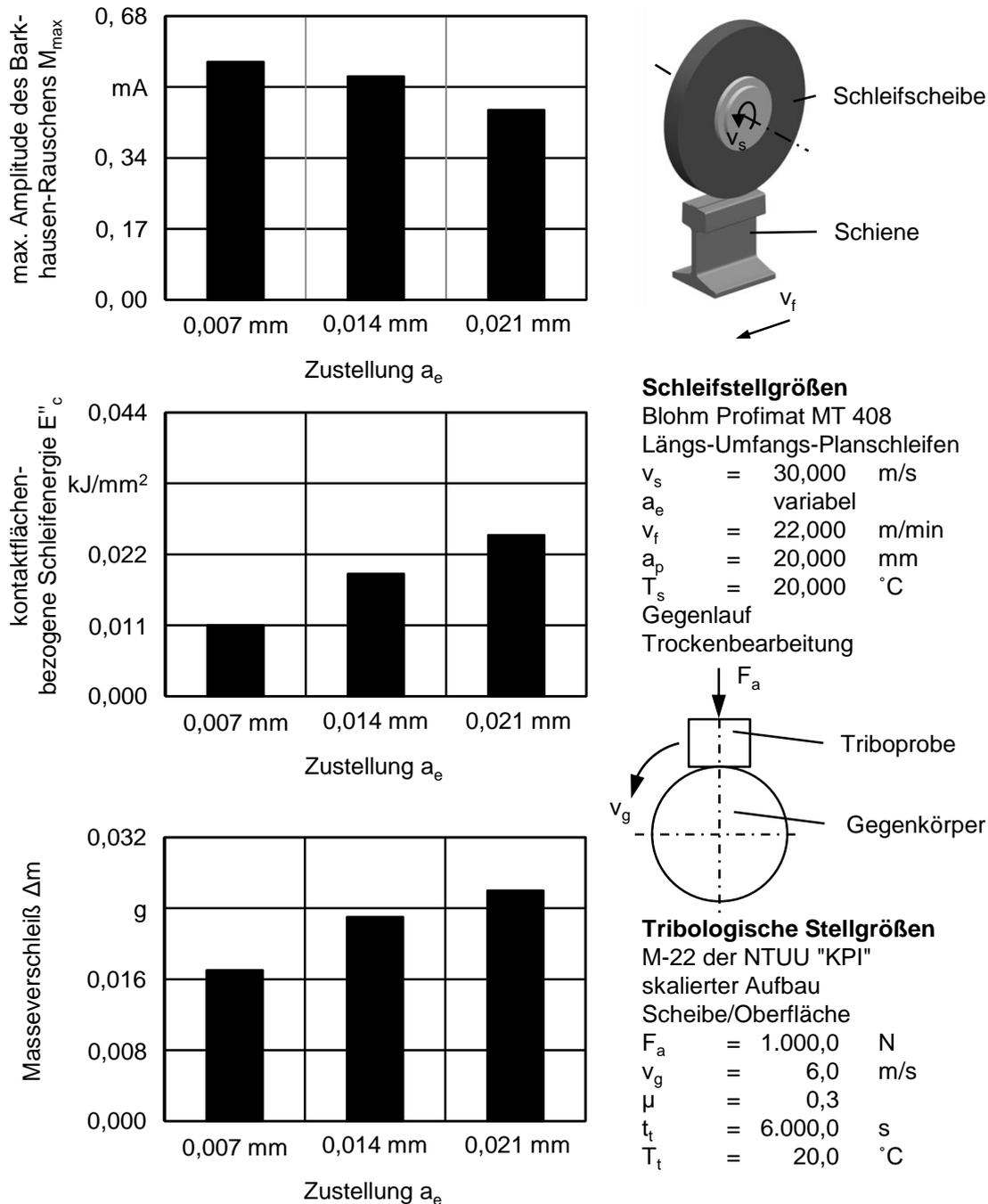
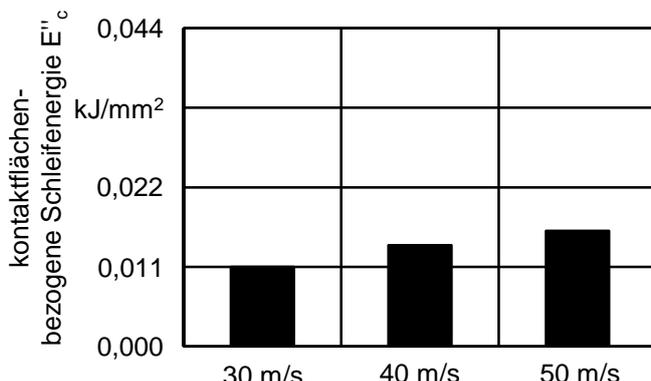
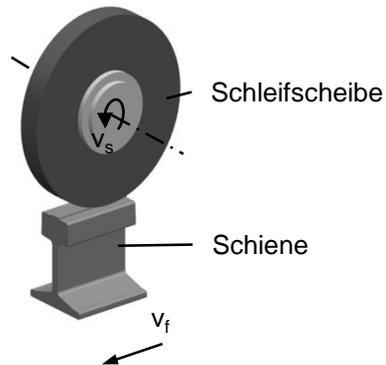
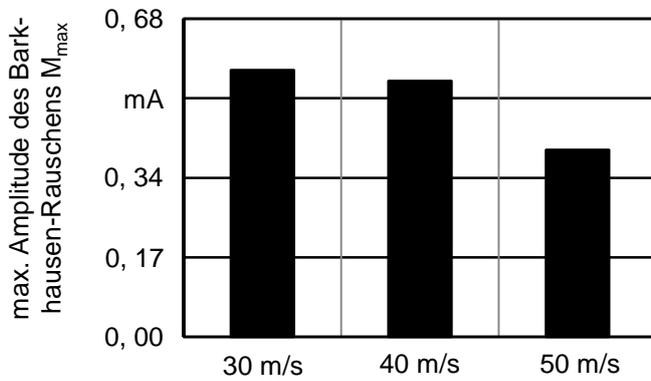


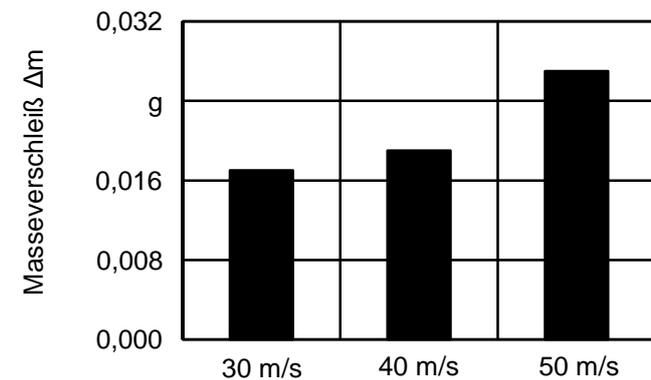
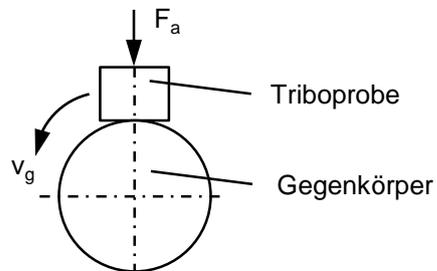
Bild 8-4: Zusammenhang der Zustellung a_e beim Schleifen in Kombination mit der kontaktfächenbezogene Schleifenergie E''_c und der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} mit dem Masseverschleiß Δm

In **Bild 8-5** ist der Einfluss der bei einer variablen Umfangsgeschwindigkeit v_s erzeugten Randzonen der Schienen auf den Masseverschleiß Δm unter Angabe der kontaktfächenbezogenen Schleifenergie E''_c sowie der maximalen Amplitude des Barkhausen-

Rauschens M_{max} gezeigt. Bei einer Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit v_s im Bereich $v_s = 30 - 50$ m/s kommt es aufgrund höherer in die Randzone hinein fließenden Wärme zur Erhöhung der WEL-Tiefe und Härtungstiefe um etwa ΔCHD HV 0,3 = 25 μm . Dies verursacht eine Steigerung des Masseverschleißes der Proben von $\Delta m = 0,016$ g bei den Schienenstücken, die mit der geringsten Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30$ m/s geschliffen werden, auf $\Delta m = 0,026$ g bei der höchsten untersuchten Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 50$ m/s.



Schleifstellgrößen
 Blohm Profimat MT 408
 Längs-Umfangs-Planschleifen
 v_s = variabel
 a_e = 0,007 m/min
 v_f = 22,000 m/min
 a_p = 20,000 mm
 T_s = 20,000 °C
 Gegenlauf
 Trockenbearbeitung

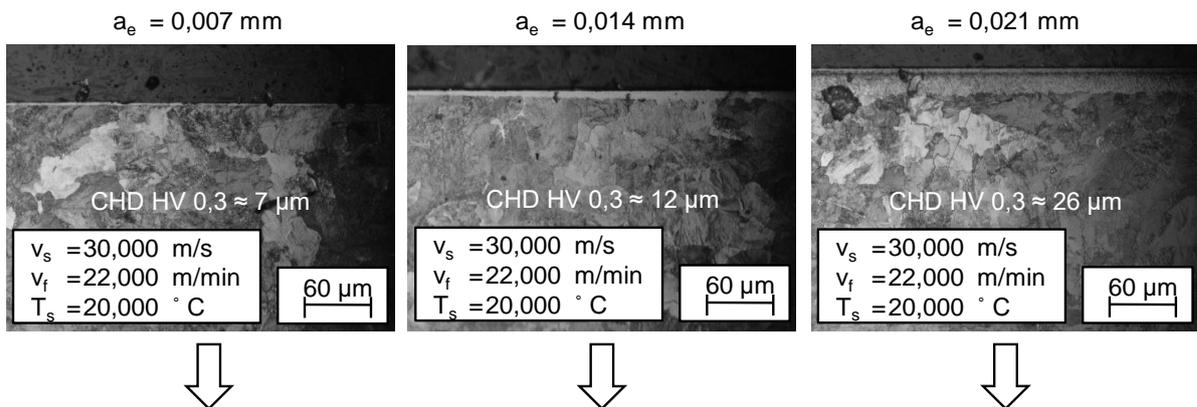


Tribologische Stellgrößen
 M-22 der NTUU "KPI"
 skalierter Aufbau
 Scheibe/Oberfläche
 F_a = 1.000,0 N
 v_g = 6,0 m/s
 μ = 0,3
 t_t = 6.000,0 s
 T_t = 20,0 °C

Bild 8-5: Zusammenhang der Umfangsgeschwindigkeit v_s beim Schleifen in Kombination mit der kontakflächenbezogene Schleifenergie E''_c und der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} mit dem Masseverschleiß Δm

In Bild 8-6 ist der exemplarische Zustand der Proben nach den tribologischen Untersuchungen in Abhängigkeit des Ausgangszustandes des Randzonengefüges dargestellt. An den Proben sind variable Längen-, Flächen- und Volumenänderungen sichtbar. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Härtungstiefe CHD HV 0,3 der Proben mit dem Masseverschleiß Δm liegt tendenziell vor. Je breiter die neugehärtete, sprödharte Randzone der Schiene ausfällt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung und letztlich des Auftretens von Fehlern. Grund hierfür ist, dass die Zugeigenspannungen zwischen der martensitisch dominierten WEL und dem Grundgefüge unter der zyklischen Belastung zur schnelleren Ermüdung und Abplatzung des Werkstoffes führen.

Randzonenbeschaffenheiten der Schienen nach dem Schleifen



Randzonenbeschaffenheiten der Schienen nach den tribologischen Untersuchungen

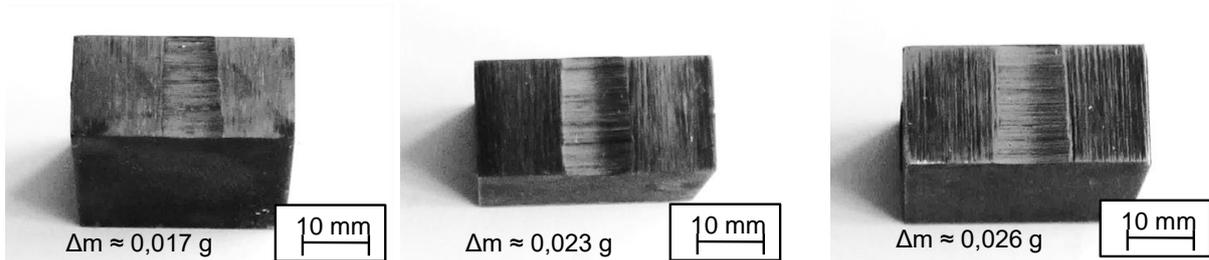


Bild 8-6: Einfluss der durch das Schienenschleifen erzeugten Randzonenbeschaffenheiten auf den Probenverschleiß

Das Hauptergebnis der tribologischen Untersuchungen ist, dass mit einer Steigerung des Maßes der Randzonenveränderung nach dem Schleifen es eindeutig zu höherem Schädigungsverhalten in Form des Masseverschleißes Δm und Ausbildung von Ermüdungsdefekten kommt. Die durch das Schleifen erzeugten WEL martensitischer Grundstruktur können unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse eindeutig als Schädigungen bezeichnet werden.

9 Übertragbarkeit der Grundlagenerkenntnisse auf Industrieanwendungen und Einsatzempfehlungen

Die Ergebnisse der umfangreichen Schleifversuche, Kapitel 7, sowie die Resultate der tribologischen Untersuchungen an den geschliffenen Schienenproben, Kapitel 8, weisen auf direkte Zusammenhänge zwischen der Schientemperatur und prozessseitigen Randbedingungen mit der nachfolgenden Schienenliegedauer hin. Das technologische Wissen wird bis dato zwar aufbauend auf einer konkreten Industrieanwendung, dem Schienenschleifen an geraden Straßenbahnschienen, jedoch unter Verwendung skalierter Werkstücke bzw. beim skalierten Rad/Schiene-Kontakt erarbeitet. Dadurch werden stets konstante Versuchsbedingungen und der Einsatz einer großen Anzahl an Schienen/Proben möglich. Im Kapitel 10 erfolgt die Verifikation der erzielten Grundlagenerkenntnisse zum Schienenschleifen und tribologischen Einsatzverhalten geschliffener Schienen hinsichtlich der Übertragbarkeit auf die praxisnahen Bauteile und reale Reparaturrandbedingungen im Gleis. Dabei erfolgt zunächst die Umsetzung und Bewertung der Schienenschleifprozesse an realen Straßenbahnschienen und Analyse der Bearbeitungsergebnisse, insbesondere der erzielten Randzonenbeschaffenheiten, hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den zuvor erlangten Grundlagenerkenntnissen. Des Weiteren werden an den bearbeiteten Schienen tribologische Untersuchungen nach dem 1:1 Rad/Schiene-Kontakt realisiert, damit Aussagen über das Materialermüdungsverhalten und die Liegedauer der Schienen getroffen werden können. Die Ergebnisse der Untersuchungen dienen des Weiteren einer Erweiterung der Wissensbasis hinsichtlich der werkstoffspezifischen Zusammenwirkung der Komponenten des Rad/Schiene-Kontaktes. Ein weiteres Ziel liegt in der Verifikation der im Kapitel 5 erarbeiteten Vorgehensweise zur zerstörungsfreien Charakterisierung der Schienenrandzonen mithilfe mikromagnetischer Parameter.

Das Vorgehen sieht zunächst die Auslegung bzw. Anpassung der Versuchsumgebungen zum Schienenschleifen und tribologischen Einsatzverhalten der Schienen für den Einsatz der langen Schienensegmente vor. Für das Schleifen der langen Schienensegmente kommt die im Kapitel 4.1.3 vorgestellte Plan- und Profilschleifmaschine Profimat MT 408 HTS der BLOHM JUNG GMBH, Hamburg, Deutschland, zum Einsatz. Aufgrund der Maschinenkinematik kann unter Berücksichtigung der Realisierung eines ausreichendes Vor- und Nachlaufes der Schleifscheibe eine maximale Werkstückgesamtlänge $l = 750$ mm eingesetzt werden.

Für die tribologischen Untersuchungen kommt der Linearprüfstand B der DEUTSCHE BAHN SYSTEMTECHNIK GMBH, Brandenburg an der Havel, Deutschland, zum Einsatz, [Bild 9-1](#). Dieser wird industriell zur Prüfung von Schienensegmenten mit einer Länge $0,7 < l_s < 1,0$ m eingesetzt. Der Auswertebereich der Überrollung beträgt dabei $l = 0,6$ m in der Mitte des Schienensegmentes. In diesem Bereich wird die maximale konstante Überrollgeschwindigkeit v_r erreicht und konstant gehalten. Die Schiene wird von einem einzelnen Rad überrollt. Einstellen lassen sich die Anpresskräfte im Bereich $F_a = 0 - 200$ kN, die Lateralkraft T_n , wobei mehrere Kombinationen des Spurkranzanlaufes mit dem Schräglauf möglich sind, sowie die Überrollgeschwindigkeit des Rades im Bereich $v_{ft} = 0 - 12$ km/h. Das Rad wird nicht zusätzlich angetrieben und erreicht seine Dreh- bzw. Umfangsgeschwindigkeit v_r aufgrund des Rollkontaktes mit der Schiene. Die zeitbezogene Belastung, also die Anzahl der Lastwechsel, ist variabel und kann in Abhängigkeit des zu erwartenden Verschleißverhal-

tens des Bauteils eingestellt werden. Der Tribologieversuchsstand eignet sich zur Untersuchung von Eisenbahnschienen, Weichenherzstücken, Zungenumschmiedungen, Isolierstößen sowie Schweißzusatzwerkstoffen.

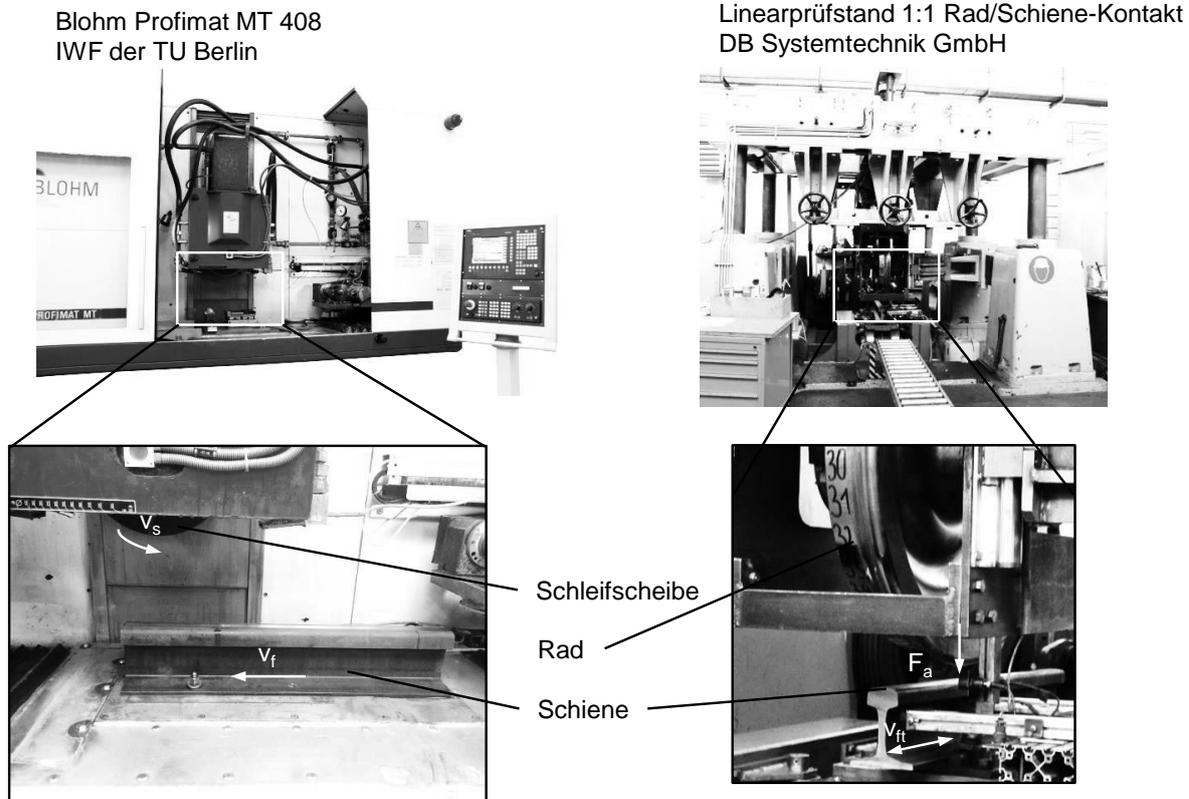


Bild 9-1: Versuchsstände für das Schienenschleifen und die tribologische Untersuchungen an langen Schienensegmenten

Als Prüflinge für die Schienenschleifversuche und tribologischen Untersuchungen kommen zwei Vignolschienen des Profils S49 der VOESTALPINE AG, LINZ, ÖSTERREICH, mit einer Länge von $l = 750$ mm zum Einsatz. Diese Schienenspezifikation ist für die Berliner Straßenbahn und einige Berliner U-Bahn-Linien üblich. Als Schleifwerkzeug kommt die kunstharzgebundene Schleifscheibe der STELLA KERAMIK, Schwarzenbach an der Saale, Deutschland, mit der Korngröße 20 Mesh und Struktur 4 zum Einsatz. Als Gegenkörper wird das Eisenbahnrad mit dem Radreifen der Spezifikation B 630 x 100 [DIN15083] der GUTEHOFFNUNGSHÜTTE RADSATZ GMBH, OBERHAUSEN, DEUTSCHLAND, eingesetzt.

Die Stellgrößenkombinationen für das Schleifen sind auf Basis der im Kapitel 7 getesteten Prozesse identifiziert. Das Ziel dabei besteht darin, möglichst unterschiedliche Aufhärtungsgradienten in der Schiene zu generieren, damit mehrere Schädigungszustände hinsichtlich des tribologischen Einsatzverhaltens analysiert werden können. Als Stellgröße mit dem größten Einfluss auf die Randzonenbeschaffenheit wird die Zustellung im Bereich $0,00 \text{ mm} < a_e < 0,03 \text{ mm}$ systematisch variiert, während die restlichen Schleifstellgrößen, die Umfangsgeschwindigkeit mit $v_s = 30 \text{ m/s}$, $v_f = 22 \text{ m/min}$, Trockenbearbeitung, sowie die Temperatur der Schiene mit $T_s = 20 \text{ °C}$, konstant gehalten werden. Die Schienen werden mit einer Schleifbreite von $a_p = 25 \text{ mm}$ plangeschleift. Entlang der effektiven Überrolllänge $l = 600 \text{ mm}$ wird eine variable Zustellung a_e und damit eine variable V-förmige Randzonenbeschaffenheit erzeugt. Das Maximum der Zustellung $a_e = 0,03 \text{ mm}$ wird in der Schienenmit-

te erreicht. Zur Herstellung der Schienensegmente mit variablen Randzonenbeschaffenheiten wird wie folgt vorgegangen:

- Planschleifen der Schiene bis zum Erreichen einer Schleifbreite von $b_{\text{eff}} \approx 22 \text{ mm}$,
- Erzeugen einer Pyramidenform auf der Schienenoberfläche, dessen Geometrie dem angestrebten Verlauf der Zustellung a_e entspricht,
- Planschleifen der Pyramidenform im Trockenschliff unter Verwendung der eingeplanten Stellgrößenkombinationen und dadurch Realisierung eines V-förmigen Verlaufs der Zustellung und Randzonenbeschaffenheit.

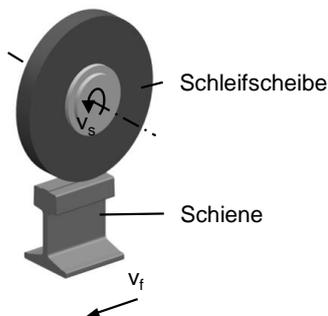
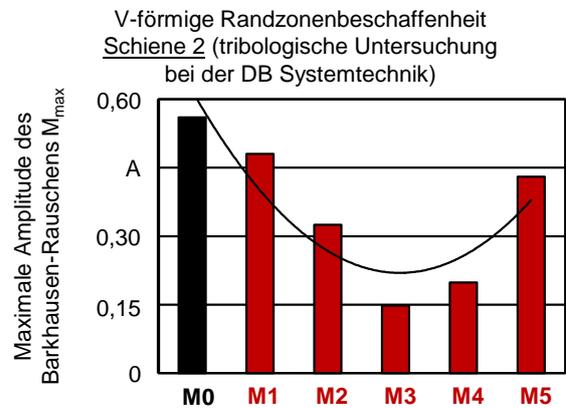
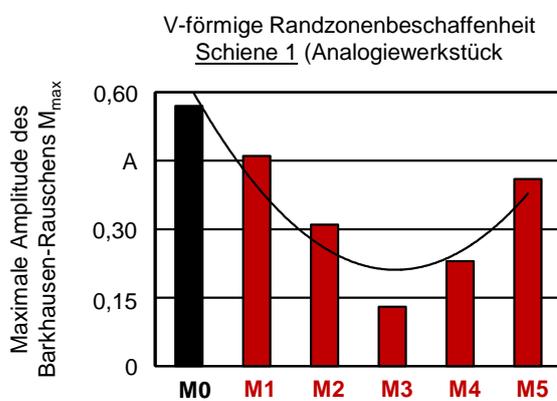
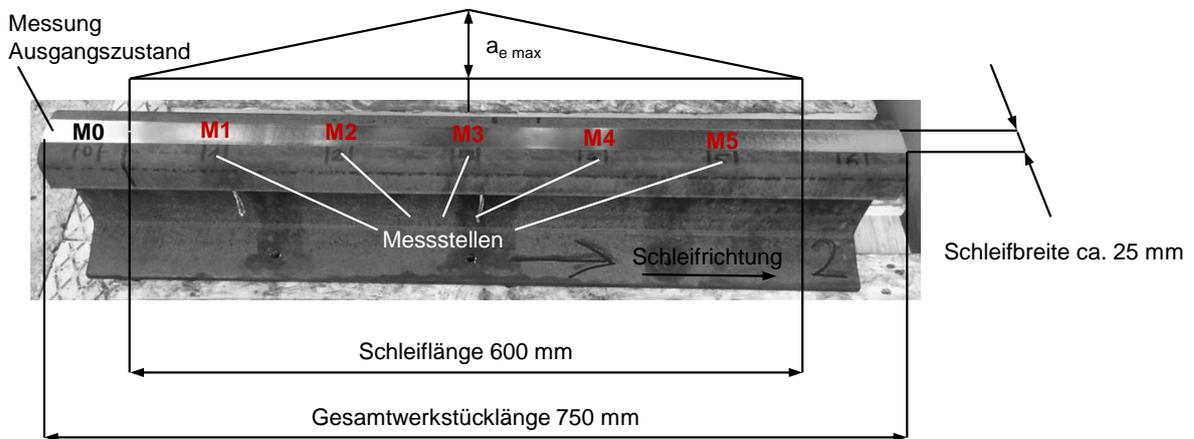
Die Analyse der erzielten Randzonenbeschaffenheit erfolgt an insgesamt fünf Messstellen, die innerhalb des tribologisch relevanten Auswertebereiches mit einer Länge $l = 600 \text{ mm}$ in der Mitte der Schiene vorliegen. Die den Messstellen entsprechenden Zustellungen a_e sind in Tabelle 9-1 gezeigt. Es werden insgesamt zwei Schienen geschliffen, wovon eine zur Zerstörung und Analyse der tatsächlichen Randzonenbeschaffenheit nach dem Schienenschleifen und die andere für die tribologischen Untersuchung des nachfolgenden Einsatzverhaltens vorgesehen sind. Zum Nachweis der Vergleichbarkeit der Randzonen an den beiden Schienen werden nach dem Schleifen die Messungen der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} durchgeführt und gegenübergestellt.

Tabelle 9-1: Schleifstellgrößen beim Schleifen der langen Schienensegmente

Messstelle	M1	M2	M3	M4	M5
eingestellte Zustellung a_e	ca. 0,01 mm	ca. 0,02 mm	ca. 0,03 mm	ca. 0,02 mm	ca. 0,01 mm
Umfangsgeschwindigkeit v_s	30 m/s				
Vorschubgeschwindigkeit v_f	22 m/min				
Schleifbreite a_p	ca. 25 mm				
Schmierung	Trockenbearbeitung				

Bild 9-2 zeigt die verwendete Schleifkinematik zur Realisierung einer variablen Randzonenbeschaffenheit der Schienen samt des Nachweises dieser in Form des Verlaufes der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} in der Schleifrichtung. Beide Schienen weisen eine vergleichbare Randzonenbeschaffenheiten auf, da die Werte der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} im gleichen Bereich liegen. Damit kann die Reproduzierbarkeit des ausgewählten Vorgehens bestätigt werden. Offensichtlich ist auch, dass die größte Randzonenschädigung, verursacht durch die höchste Zustellung $a_e = 0,03 \text{ mm}$, tatsächlich in der Mitte der Schienen vorliegt. Das Maß der Randzonenschädigung nimmt mit der Entfernung von der Mitte des Werkstückes ab. Es ist jedoch zu verzeichnen, dass an den beiden Schienen keine gänzlich symmetrischen Randzonenprofile links und rechts von der Mitte erzeugt werden, da die Werte der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens in der zweiten Schienenhälfte, sprich am Ende der Schleifbearbeitung, geringer ausfallen als diese in der ersten Schienenhälfte, Anfang der Schleifbearbeitung. Dies kann damit erklärt werden, dass aufgrund der relativ hohen Zustellung a_e in Kombination mit der Trockenbearbeitung auf einer Schleifbreite von $a_p \approx 25 \text{ mm}$ hohe Schleifenergien generiert werden. Dabei entwickelt sich das Wärmefeld der Schleifscheibe voraus, was zur höheren Temperatur der

Schiene T_s am Ende führt. Das hat zur Folge, dass mit der Steigerung der Schleifdauer größere Abweichungen von den eingestellten Zustellungen hin zu Abtrennung höherer Materialvolumina verursacht werden.



Schleifprozess
Längs-Umfangs-Planschleifen
Schleifstellgrößen
 $v_s = 30$ m/s
 $a_e =$ variabel mm
 $v_f = 17$ m/min
 $a_p =$ variabel mm
Gegenlauf, Trockenbearbeitung
Maschine
Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeug
zylindrische Schleifscheibe
STELLA KERAMIK
 $300 \times 30 \times 127$ mm³
Korngröße 20 Mesh
Struktur 4
Kunstharzbindung
Werkstück / Schiene
gerade Vignolschiene S49
Stahl R260, VOESTALPINE AG
 $l = 750$ mm
 $l_s = 600$ mm
 $T_s = 20$ °C

Bild 9-2: Variable Beschaffenheit der Versuchsschienen nach dem Schleifen

Die tribologischen Untersuchungen werden unter einer Belastung von $F_a = 1.000$ kN durchgeführt. Insgesamt werden 50.000 Lastzyklen realisiert, wobei der Zustand der Schiene in systematischen Abständen nach $n = 1.000, 2.000, 3.000, 5.000, 10.000, 20.000, 30.000, 40.000$ und 50.000 Lastzyklen hinsichtlich einer Rissbildung mithilfe der Magnetpulverprüfung analysiert wird. Nach dem Abschluss der tribologischen Untersuchungen erfolgt die Zerstörung der Schiene mit der darauf folgenden Analyse der Randzonenbeschaffenheit an fünf gleichen Messstellen, wie schon bei der Referenzschiene. Abschließend erfolgt anhand des Randzonenabgleiches nach dem Schleifen und den tribologischen Untersuchungen die

Ermittlung des Zusammenhanges zwischen der variablen Zustellung a_e mit dem nachfolgenden Verschleißverhalten der Schienen.

In Bild 9-3, Bild 9-4, Bild 9-5, Bild 9-6 und Bild 9-7 sind die Beschaffenheiten der Randzonen nach dem Schleifen und der nachfolgenden tribologischen Belastung separat für jede der fünf Messstellen gezeigt. Während der Schienenstahl R260 im Ausgangszustand ein ferritisch-perlitisches Gefüge aufweist, werden durch die Schleifvorgänge mikrokristalline, martensitisch geprägte white etching layers (WEL) induziert. Diese werden aufgrund der Zerstörung der Zementitlamellen und der nachfolgenden Kohlenstoffabsorption infolge der thermischen bzw. mechanischen Belastung ausgebildet. Die Härtungstiefe der Randzonen nach dem Schleifen korreliert dabei proportional mit der Steigerung der Zustellung a_e . Sowohl die lichtmikroskopischen Gefügebildungen als auch die Randzonenkennwerte Härtungstiefe CHD HV 0,3 und maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} ähneln diesen aus der technologischen Untersuchung des Schienenschleifens im Kapitel 7. Damit kann auf eine sehr gute Übertragbarkeit der Grundlagenerkenntnisse auf die realen Bauteile geschlossen werden.

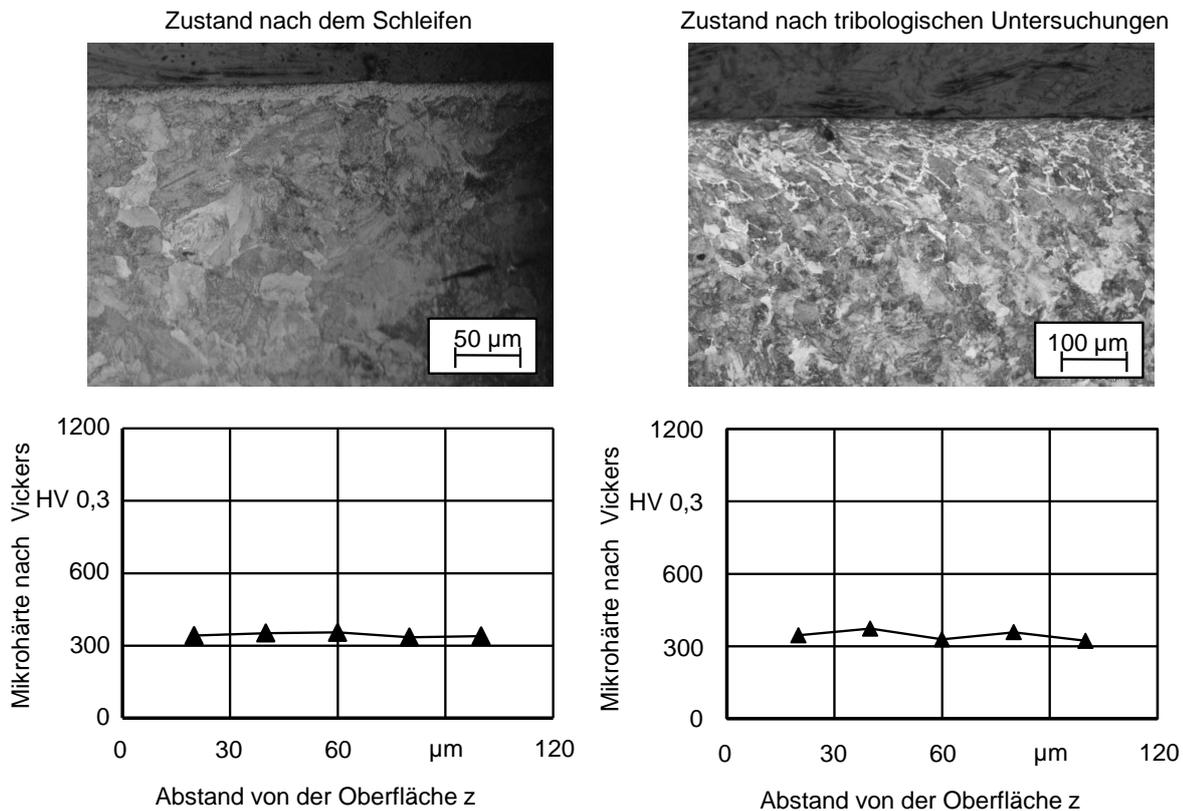


Bild 9-3: Einfluss des Schienenschleifens auf das Schädigungsverhalten an der Messstelle M1

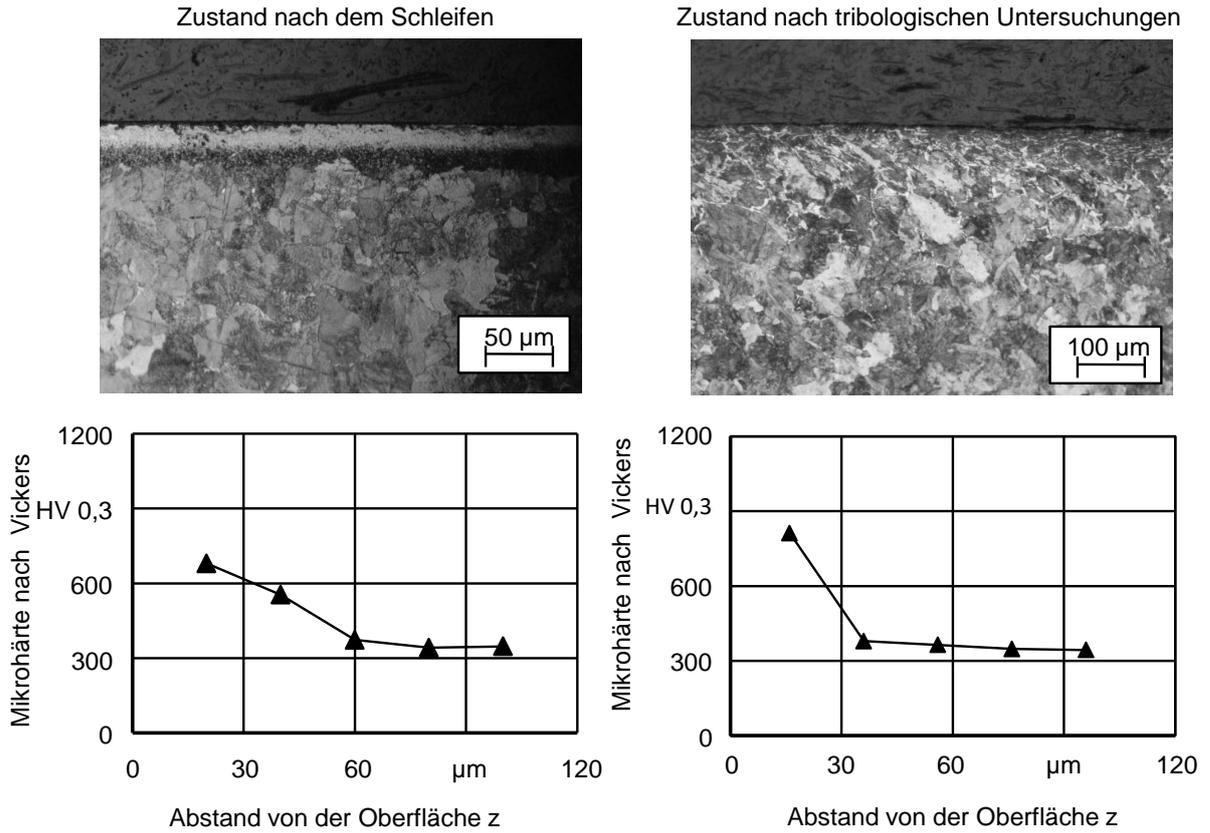


Bild 9-4: Einfluss des Schienenschleifens auf das Schädigungsverhalten an der Messstelle M2

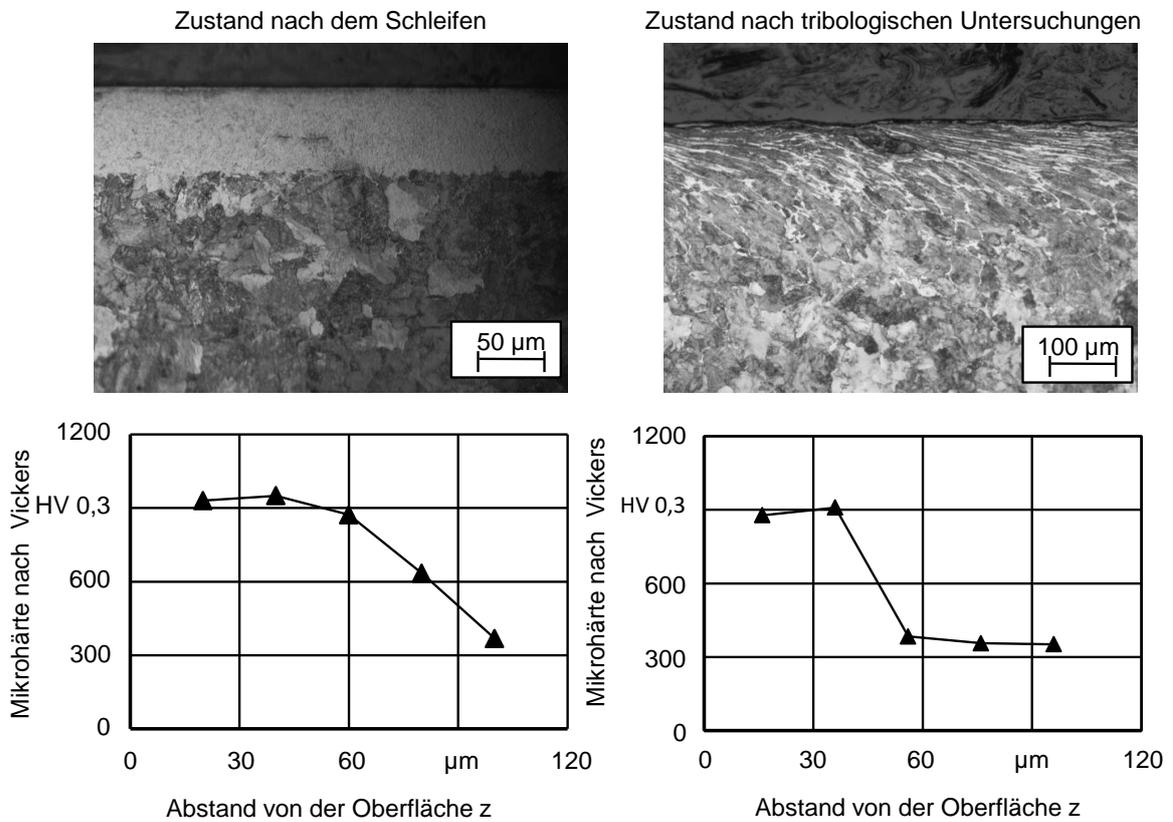


Bild 9-5: Einfluss des Schienenschleifens auf das Schädigungsverhalten an der Messstelle M3

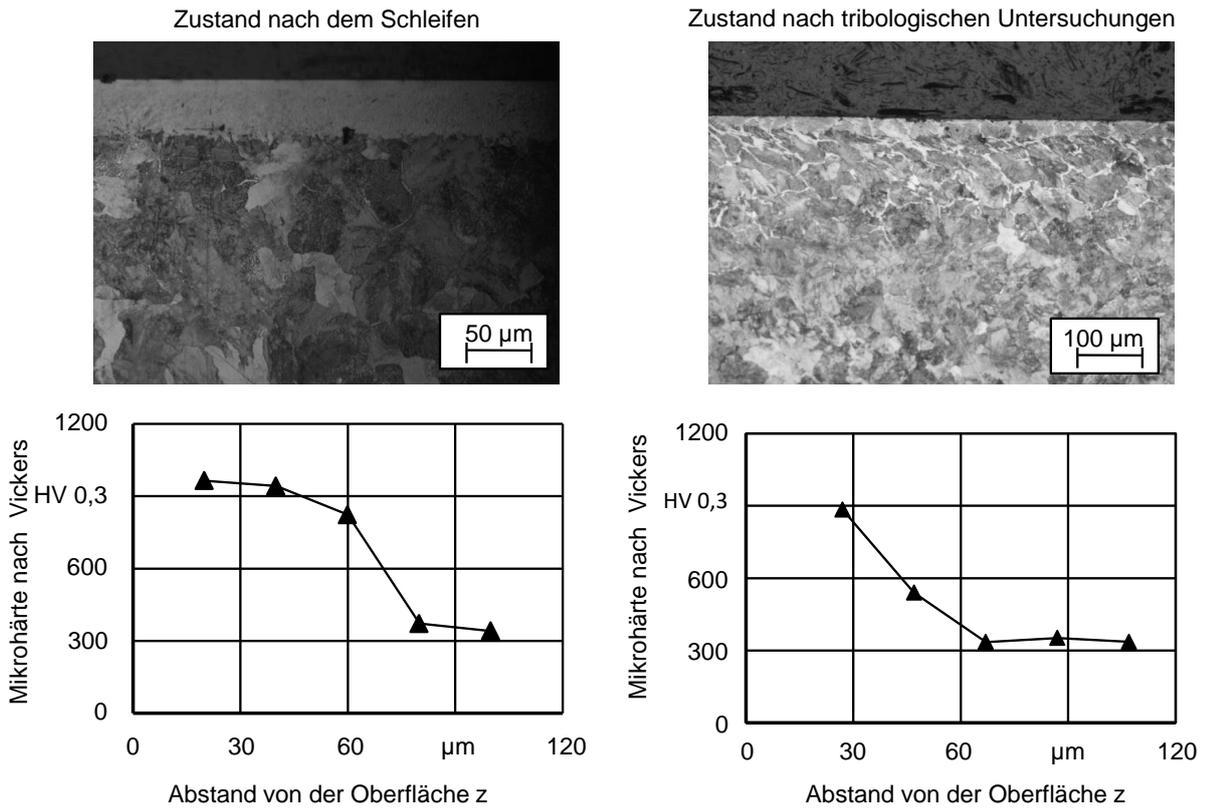


Bild 9-6: Einfluss des Schienenschleifens auf das Schädigungsverhalten an der Messstelle M4

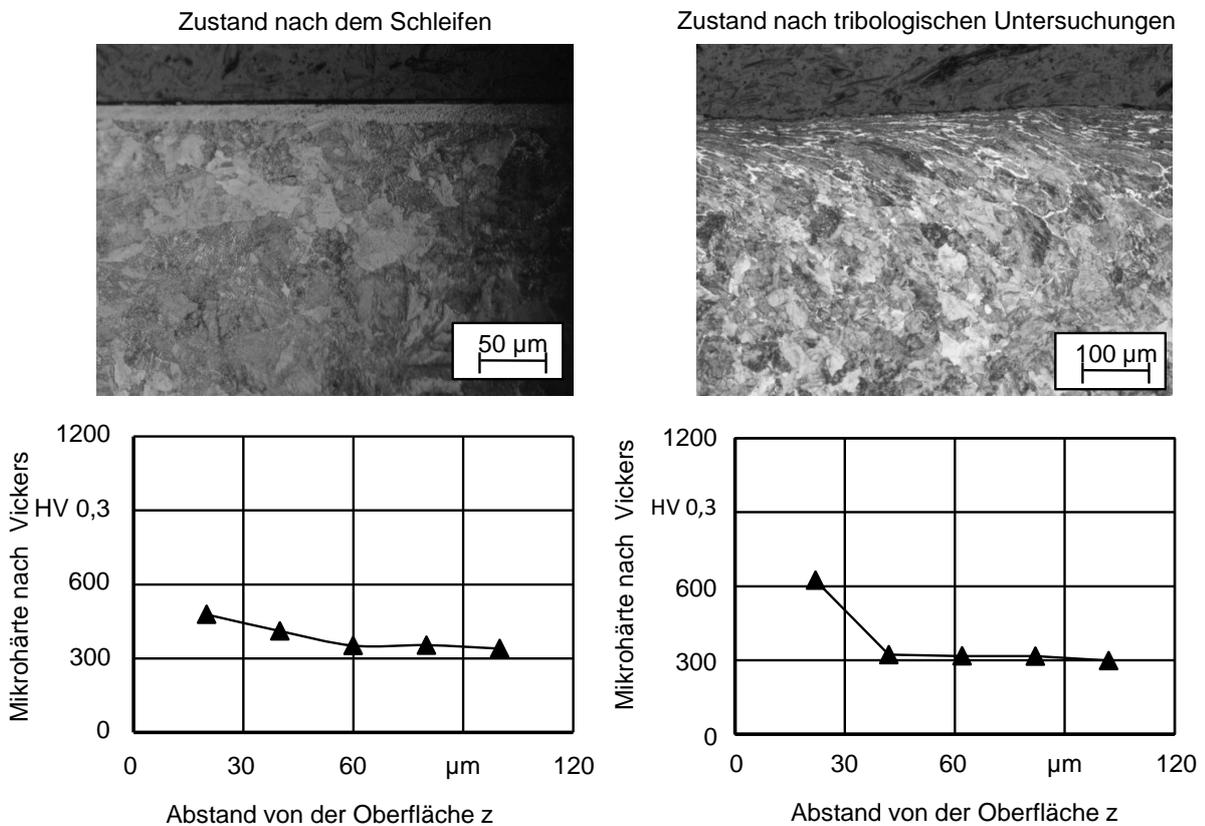


Bild 9-7: Einfluss des Schienenschleifens auf das Schädigungsverhalten an der Messstelle M5

Bei der Analyse der Querschliffbilder der Schienenrandzonen nach den tribologischen Untersuchungen fällt auf, dass es hierbei stets zu plastischen Deformationen der randzonennahen Schicht kommt. Die Deformationen richten sich etwa in einem Winkel von $\alpha \approx 45^\circ$ zur Oberfläche aus und stellen ein aus den anderen Literaturquellen bekanntes Bild einer tribologisch beanspruchten Materialschicht dar [GEB15, EGL04]. Die Reibungsmechanismen werden hierbei durch die örtlich und zeitlich auftretenden Mikrokontakte verursacht [WIL08], deren Anzahl mit der Steigerung der Normalkraft N des Rad/Schiene-Kontaktes zunimmt. Bei plastischen Deformationen werden die Rauheitsspitzen der Oberflächen plastisch deformiert. Die Haupteinflussfaktoren darauf sind die reale Kontaktfläche A , die resultierende Schubfestigkeit während der Scherbeanspruchung und die mittlere Scherfestigkeit an der gleitenden Grenzfläche. Durch die tribologische Materialbelastung werden Druckeigenstressungen in die Randzone eingebracht. Die plastischen Deformationen werden durch die Überschreitung der Werkstoffstreckgrenze hervorgerufen, was bei einer weiteren zyklischen Belastung zu einer Kaltverfestigung führt. In Abhängigkeit des Ausgangszustandes werden verschiedene Verformungsgrade der Randzone beobachtet.

Bei einer detaillierten Analyse der Mikrohärt-Verläufe in den Randzonen wird des Weiteren sichtbar, dass ein höherer Grad der Randzonenschädigung höhere Kaltverfestigung des Materials in den plastisch deformierten Bereichen mit sich bringt. Bei der Zustellung $a_e \approx 0,03$ mm auf der Messstelle M1, die nach dem Schleifen eine Härtungstiefe von CHD HV 0,3 ≈ 16 μm aufweist, kann nach den tribologischen Untersuchungen kaum eine Aufhärtung der Randzone gemessen werden. Hierbei wird zwar ein plastisches Fließen des Materials verursacht, jedoch kommt es dabei kaum zur Kaltverfestigung der Randzone. Bei der höchsten eingesetzten Zustellung $a_e \approx 0,03$ mm auf der Messstelle M3 weist die Schienenrandzone dagegen bereits nach dem Schleifen ein hohes Maß an Schädigung in Form einer Härtungstiefe von CHD HV 0,3 = 59 μm auf. Dies führt dazu, dass durch die hohen Spannungen in normaler und tangentialer Richtungen eine höhere Verformungsintensität zu einer Verfestigung des Werkstoffes im randzonennahen Bereich führt. Während die schmalen WEL durch den Tribotest vollständig abgelöst sind, bleiben die größeren WEL nach der tribologischen Untersuchung zum Teil bestehen. Entlang eines Querschliffes können Bereiche mit einer periodischen Anwesenheit der WEL und einer schwankenden Mikrohärt beobachtet werden. Bei den Messstellen M2, M3 und M4, die Zustellungen im Bereich $a_e \approx 0,02 - 0,03$ mm entsprechen, können des Weiteren diverse Oberflächendefekte identifiziert werden, die in [Bild 9-8](#) gezeigt sind. Diese können dabei in drei Gruppen aufgeteilt werden:

- Schmale Ermüdungsrisse, die senkrecht zu Schleifrichtung verlaufen; diese werden primär in den durch das Schleifen erzeugen WEL mit einer hohen Härtungstiefe induziert und verlaufen bis in das Substrat hinein.
- Materialausbröckelungen, die durch starke plastische Deformationen verursacht werden; teilweise werden vulkanartige Krater an der Oberfläche gebildet; das Gefüge ist vergleichbar zu Minisquats.
- Schwankende Randzonenbeschaffenheiten in Form der WEL mit variabler Breite.

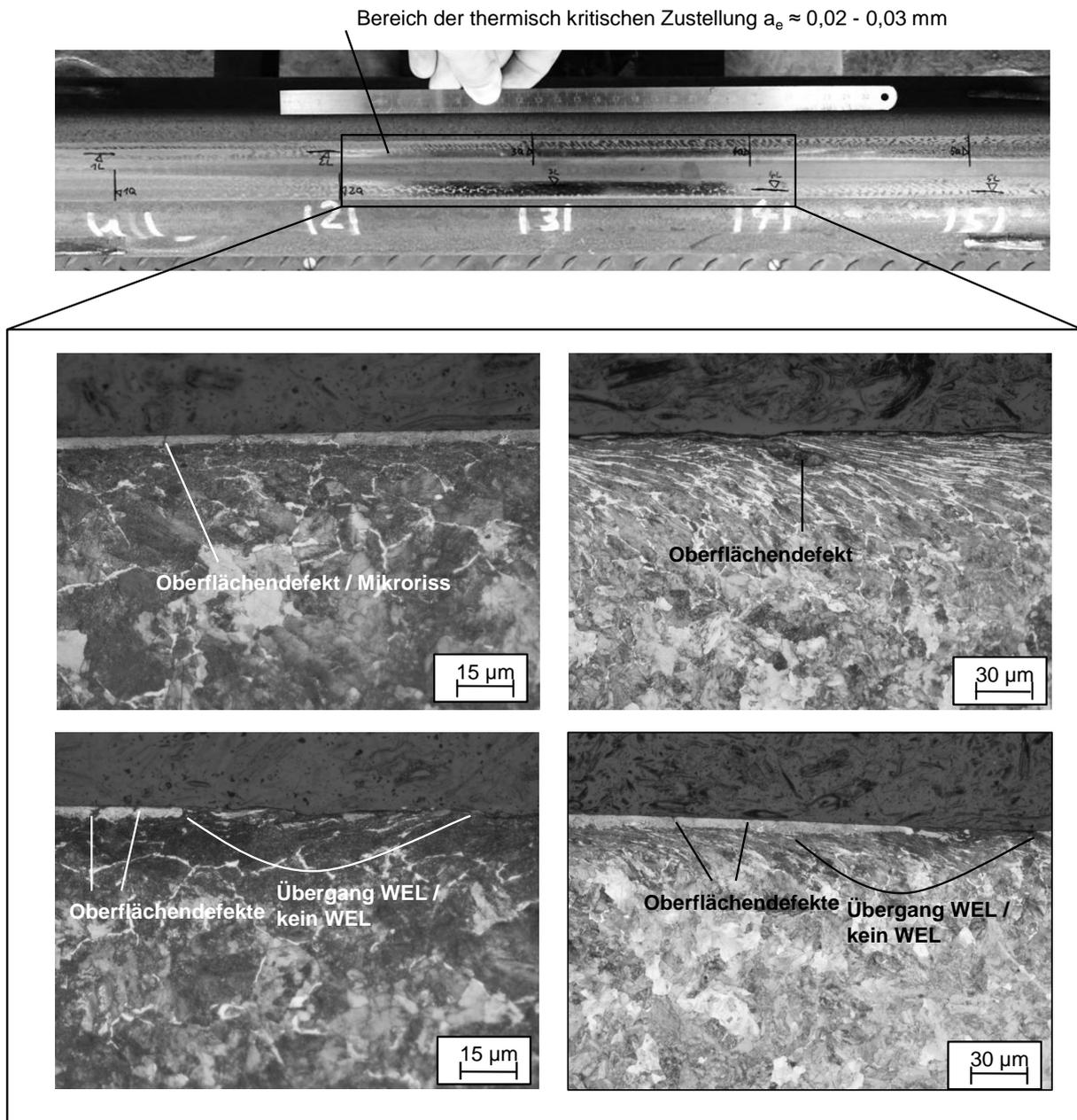


Bild 9-8: Auswirkung der thermisch kritischen Zustellungen $a_e \approx 0,02 - 0,03 \text{ mm}$ auf das Schieneneinsatzverhalten

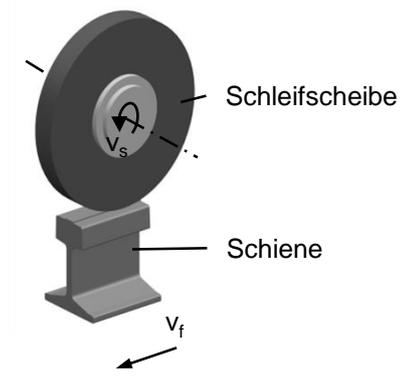
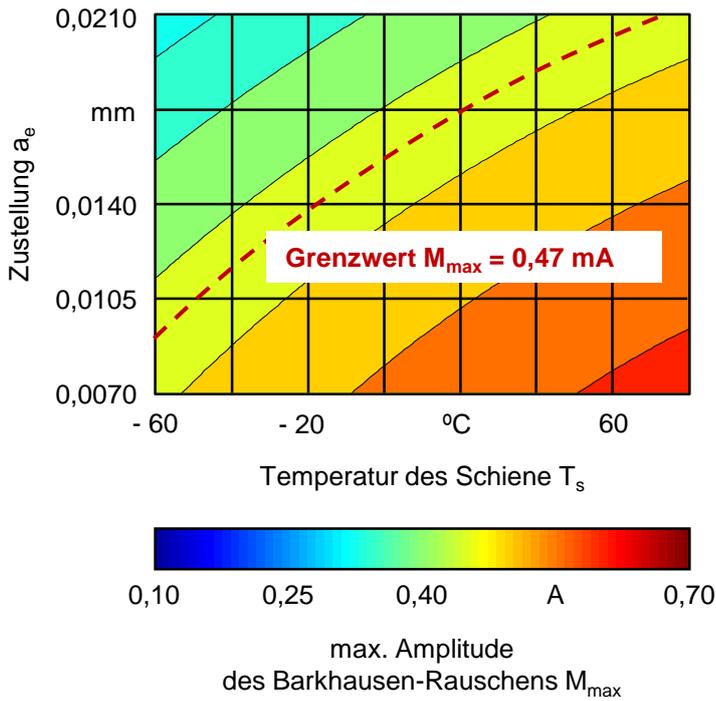
Die Anzahl der Mikrodefekte nimmt dabei mit der Steigerung der Zustellung a_e systematisch zu. Die festgestellten Materialdefekte, wie Mikrorisse oder Materialausbröckelungen, sind hinsichtlich des Schienenverschleißverhaltens kritisch. Oft werden des Weiteren wechselnde Randzonenbeschaffenheiten in der Querrichtung zur Überführung beobachtet. Durch die Tribotests wird eine komplette bzw. teilweise Abtrennung der WEL verursacht. Als hauptsächlicher Verschleißmechanismus kann die Oberflächenzerrütung genannt werden, wobei die in den Randzonen durch das Schleifen induzierten Zugeigenspannungen freigesetzt werden und zunächst Mikrorisse und bei einer weiteren Belastung Makrodefekte gebildet werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein bestimmtes Maß an plastischen Deformationen durch die tribologische Beanspruchung der geschliffenen Schienen immer vorhanden ist. Die plastische Materialverformung der bei den geringen Zustellungen von $a_e \approx 0,01 - 0,02$ mm geschliffenen Schienen ähnelt diesen an den nicht bearbeiteten Schienen. Bei den höheren Werten der Zustellung von $a_e \approx 0,02 - 0,03$ mm, die ein höheres Maß der Randzonenschädigung durch das Schleifen verursachen, wurde infolge des Rad/Schiene-Kontaktes die Ausbildung einer Mehrzahl an Defekten beobachtet, die hinsichtlich des Schieneneinsatzverhaltens kritisch sind. Für eine anforderungsgerechte Schleifbearbeitung der Schienen wird empfohlen, Randzonenzustände zu erzeugen, die die Vermeidung dieser Defekte ermöglichen. Für den untersuchten Anwendungsfall stellt sich die Härtungstiefe der Randzone von CHD HV 0,3 = 20 μm somit als Grenzmaß der Randzonenveränderung dar. Es wird empfohlen, dass die Schienenrandzonen nach dem Schleifen eine Härtungstiefe im Bereich CHD HV 0,3 \leq 20 μm aufweisen sollen. Unter Berücksichtigung der im Kapitel 7 erlangten Erkenntnisse über den Zusammenhang der Prozessstellgrößen mit den Prozesskennwerten und Bearbeitungsergebnissen, können auf dieser Basis konkrete Empfehlungen hinsichtlich prozesseitiger Systemgrenzen und sinnvoller Stellgrößenbereiche für das Schienenschleifen abgeleitet werden. Als Indikator für die im Prozess generierte Energie soll kontaktfächenbezogene Schleifenergie $E''_c = 0,02$ kJ/mm² nicht überschritten werden. Als Grenzwerte bei einer Analyse der Randzonenbeschaffenheit im zerstörungsfreien Modus werden die maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens $M_{\text{max}} \geq 470$ mA und Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellanalyse, $H_{\text{co}} \leq 8$ kHz definiert. Zur Gewährleistung einer schädigungsarmen, optimierten Schleifbearbeitung können daraus aufbauend konkrete Stellgrößenbereiche abgeleitet werden, die in Tabelle 9-2 genannt sind. Die Definition der Stellgrößenbereiche und des E''_c -Grenzwertes für eine schädigungsarme Schienenschleifbearbeitung ist dabei beispielhaft für die Schientemperatur $T_s = 20$ °C gezeigt.

Tabelle 9-2: Stellgrößenbereiche für eine schädigungsarme Schienenschleifbearbeitung

Schleifstellgröße	Wertebereich
Umfangsgeschwindigkeit v_s	30 - 40 m/s
Zustellung a_e	$\leq 0,01$ mm
Vorschubgeschwindigkeit v_f	22 - 59 m/min

Für abweichende Schientemperaturen sollen die Werte der kontaktfächenbezogenen Energie E''_c und die Stellgrößenbereiche unter Verwendung des im Kapitel 7.1 entwickelten deskriptiven Modells zur Vorhersage der Prozesskennwerte und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen herangezogen werden. In Bild 9-9 ist exemplarisch der Verlauf des Grenzwertes der kontaktfächenbezogenen Energie E''_c in Abhängigkeit der Schientemperatur gezeigt. Dieser steigt mit der Steigerung der Schientemperatur T_s , wie im Kapitel 7 gezeigt. Somit steht abschließend ein Modell zur Verfügung, mit dem durch die reine Variation der Zustellung a_e auf saisonale veränderte Schientemperaturen T_s reagiert werden kann, um eine Schienenrandzone für eine lange Liegedauer zu realisieren. Ein weiteres relevantes Ergebnis des Kapitels 9 ist, dass sich das 3MAIL-Verfahren gut für einen Einsatz im realen Gleis eignet, was aufgrund der Vergleichbarkeit der Messwerte an den skalierten und realen Schienen sichtbar ist.



Modell

Regressionsmodell nach
Tabelle 7-1

Modelleingangsgrößen

$v_s = 30$ m/s
 $a_e = 0,007 - 0,021$ mm
 $T_s = -60 - 80$ °C
 $v_f = 22$ m/min
 Trockenbearbeitung

Bild 9-9: Verlauf der Grenzwerte der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} in Abhängigkeit der Schienentemperatur T_s

10 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Die Schleifarbeiten im Gleis werden nach implizitem Anwenderwissen ausgelegt und durchgeführt, was inkonstante Vorgehensweisen unter Verwendung variierender Schleifwerkzeuge und Prozesse verursacht. Eine gängige Vorgehensweise zur Bewertung der Bearbeitungsqualität hinsichtlich der Randzonenveränderung existiert nach derzeitigem Stand des Wissens nicht, was die Aussagen über die Liegedauer der Schienen nach dem Schleifen erschwert. Gegenüber den meisten Schleifverfahren aus der Neufertigung werden die Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen zusätzlich durch externe Einflussfaktoren, wie die Außentemperatur und den Niederschlag, beeinflusst. Der Beitrag der vorliegenden Arbeit besteht in der erstmaligen Schaffung des grundlegenden Wissens zum Schienenschleifen aus fertigungstechnischer Sicht. Als Hauptziel wurde die Schaffung einer Erkenntnisbasis über die werkzeug- und prozessseitigen Grundlagen des Schienenschleifens in Kombination mit der Schientemperatur und deren Wechselwirkung mit dem nachfolgenden tribologischen Einsatzverhalten der Schienen verfolgt.

Zur systematischen Schaffung des Grundlagenwissens zum Schienenschleifen unter Laborbedingungen wurde ein konkretes Anwendungsszenario, das Längs-Umfangs-Planschleifen der Schienen im Straßenbahnnetz, identifiziert. Auf dieser Basis wurden die Anwender- bzw. Normanforderungen bezüglich der Rauheit $R_a < 10,0 \mu\text{m}$, Ebenheit der Fahrfläche $H = \pm 0,5 \text{ mm}$ auf 1 m Schienenlänge, Überfahrgeschwindigkeit $v_f > 10 \text{ m/min}$ und Bearbeitungsproduktivität in Form des bezogenen Zeitspannungsvolumens $Q'_w > 2,0 \text{ mm}^3/\text{mms}$ abgeleitet. Es wurde des Weiteren festgestellt, dass keine konkreten Angaben bezüglich der Randzonenqualität nach dem Schienenschleifen vorhanden sind. Auf dieser Basis wurden werkzeug- und prozessseitige Stellgrößen zur systematischen Untersuchung des Schienenschleifens definiert und die Versuchsumgebungen zum Schienenschleifen und zur tribologischen Analyse des Schieneneinsatzverhaltens entwickelt.

Zur Erarbeitung von Vorgehensweisen und Messverfahren zur Qualifizierung der Schienenrandzonen im zerstörungsfreien Modus wurden eine Vielzahl mikromagnetischer Kenngrößen anhand theoretischer Vorbetrachtungen und experimenteller Messungen analysiert. Der Fokus lag dabei auf der Identifikation der Messkenngrößen, die reproduzierbare Korrelationen mit den durch das Schienenschleifen erzielten variablen Beschaffenheiten der Schienenrandzonen haben. Das Ergebnis ist die Charakterisierung der zwei mikromagnetischen Kenngrößen, maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} und Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} , die qualitative Aussagen über die Härtungstiefe der Schienenrandzonen CHD HV 0,3 ermöglichen. Eine gute Eignung der genannten Kenngrößen zur Bewertung der Reparaturqualität nach dem Schienenschleifen wurde durch die Messungen an langen, aus einer Schienenstrecke herausgenommenen, Schienensegmenten, bestätigt. Die funktionalen Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} und Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co} mit den Randzonenparametern der Schienen wurden modellhaft beschrieben, damit verbesserte Voraussetzungen für deren Einsatz bei realen „In-Gleis“-Instandsetzungen geschaffen werden können.

Die Analyse der temperatur- und stellgrößenabhängigen Spanbildungsmechanismen beim Schienenschleifen erfolgte im Rahmen von Einkornritzversuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperatur des Ritzwerkstückes T_r sowie die wesentlichen Ritzstellgrößen, Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Ritzzustellung a_{er} , einen sichtbaren Einfluss auf die Spanbildungsmechanismen haben. Zu deren Bewertung wurde der Abtrennfaktor f_{ab} analysiert, der Aussagen über die Effektivität der Spanbildung erlaubt. Mit der Steigerung der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r wächst die Effektivität der Bearbeitung, da die Werte des Abtrennfaktors f_{ab} steigen. Grund hierfür ist die anhand der Steigerung der Ritzkennwerte zu vermutende Veränderung der mechanischen Materialkennwerte, wie die Bruchzähigkeit und Zerspanbarkeit. Bei geringen Temperaturen des Ritzwerkstückes $-60\text{ °C} < T_r < 0\text{ °C}$ ist die Spanbildung im Wesentlichen durch das sogenannte Mikropflügen beeinflusst, während bei einer weiteren Steigerung der Temperatur im Bereich $0\text{ °C} < T_r < 80\text{ °C}$ hingegen schon das Mikrospanen den dominierenden Spanbildungsmechanismus darstellt. In Bezug auf den Einfluss der Ritzstellgrößen wurde festgestellt, dass eine Steigerung der Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} zur Reduktion des Abtrennfaktors f_{ab} und Steigerung der Sprödhartigkeit der Spanbildung führt. Auch eine variable Ritzzustellung a_{er} verursacht eine Veränderung der Fließeigenschaften des Spanes. Die erzielten technologischen Zusammenhänge beim Einkornritzen wurden in Form entwickelter deskriptiver Prozessmodelle zusammengefasst. Eine sehr gute Aussagekraft wurde durch zusätzliche Verifikationsversuche aufgezeigt.

Die technologischen Untersuchungen zum Schienenschleifen bestanden aus insgesamt vier Untersuchungsgegenständen. In diesen wurde der Einfluss der Schienentemperatur, Schmiermengen, werkzeugseitigen Stellgrößen und Hochleistungsschleifbearbeitung, stets unter Variation systemrelevanter Prozessstellgrößen, auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte analysiert. Bei der Steigerung der Schienentemperatur T_s werden zunehmend günstige elasto-plastischen Werkstoffeigenschaften verursacht, was zu einer Verbesserung der Oberflächenkenngrößen und Reduktion des Maßes thermischer Randzonenschädigung führt. Die Zustellung a_e weist beim Schienenschleifen einen proportionalen Zusammenhang zur Verschlechterung der Schienenrauheit und Zunahme des Grades der thermischen Randzonenänderung auf. Die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit v_s verursacht eine Reduktion der Oberflächenkennwerte, jedoch vergrößern sich dabei auch die Wärmeeinträge in die Randzone. Bei der Betrachtung variabler Werte der Vorschubgeschwindigkeit v_f wurde festgestellt, dass bei einer Steigerung der Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich $17\text{ m/min} < v_f < 27\text{ m/min}$ die Rauheitskennwerte aufgrund der Reduktion der Einzelkornspannungsdicken h_{cu} zunehmen. Das Maß der Randzonenveränderung wird jedoch bei den steigenden Vorschubgeschwindigkeiten v_f geringer.

Bei der Analyse variabler Schmierstrategien wurde gezeigt, dass diese die Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen zum Teil nennenswert beeinflussen. Die Schmierstrategie der Kühlschmierstoffbenetzung des Werkzeuges und der Schiene führt bei Zustellungen von $a_e = 0,021\text{ mm}$ zur Reduktion der Rauheitskennwerte und Steigerung der Materialanteile. Die Schmierstrategie der Überflutungskühlung bringt erwartungsgemäß tendenziell etwas geringere Werte der Rauheit sowie höhere Werte des Materialanteils gegenüber beiden anderen Schmierstrategien mit sich. Bei der Analyse des Einflusses der Schmierstrategie auf die Randzonenbeschaffenheit von Schienen wurde festgestellt, dass die Strategie der Kühlschmierstoffbenetzung des Werkzeuges und der Schiene bei Zustellungen von $a_e \geq 0,014\text{ }\mu\text{m}$ zur Reduktion des Maßes der Randzonenveränderung gegenüber der Tro-

ckenbearbeitung führt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird die Schmierstrategie der Kühlschmierstoffbenetzung des Werkzeuges und der Schiene zum Einsatz in mobilen Schienenschleifvorrichtungen empfohlen.

Die Analyse der werkzeugseitigen Stellgrößen auf die Bearbeitungsergebnisse beim Schienenschleifen hat gezeigt, dass mit diesen insbesondere die Randzonenbeschaffenheit beeinflusst wird. Mit der Steigerung des mittleren Korndurchmessers d_{KG} wächst das Maß thermischer Randzonenveränderung, was durch höhere Energien zur Spanbildung und Umformung infolge gesteigerter Spannungsdicken h_{cu} verursacht wird. Ein relativ geringer Anteil des Sinterkorundes im Werkzeug von 15 % bringt eine signifikante Verbesserung des Bearbeitungsergebnisses gegenüber der Bearbeitung mit einem reinen Schmelzkorundwerkzeug mit sich. Durch die Erhöhung des Struktur-Wertes und dem damit verbundenen Wechsel der volumetrischen Anteile von Körnern, Bindung und Poren hin zu höherer Porosität wird tendenziell eine Reduktion des Maßes der Randzonenveränderung aufgrund eines besseren Wärmefflusses durch das Werkzeug bewirkt.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Hochleistungsschleifbearbeitung mit gesteigerten Werten des bezogenen Zeitspannungsvolumens Q'_w wurde ein eindeutiger Einfluss sowohl der Zustellung a_e als auch der Vorschubgeschwindigkeit v_f festgestellt. Die gesteigerten Werte der Zustellung $a_e = 0,028 - 0,063$ mm verursachen eine größere Veränderung des Maßes der Randzonenbeschaffenheit gegenüber gesteigerten Werten der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 32 - 57$ m/min. Während bei der Steigerung der Zustellung massive Randzonenschädigungen bereits bei $a_e = 0,014$ μm erzeugt werden, verändert sich die Schienenrandzone bei einer Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit v_f nur langsam hin zur Vergrößerung der Breite von white etching layers (WEL) und Härtungstiefe CHD HV 0,3. Aus diesem Grund kann eine weitere, wirtschaftlich sinnvolle Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit im Bereich $v_f \geq 57$ m/min sinnvoll sein. Dabei soll beachtet werden, dass bei einer trockenen Schienenschleifbearbeitung sehr langsame Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f < 17$ m/min zu vermeiden sind, da dabei aufgrund hoher Schleifkontaktzeiten Δt ein hohes Maß der Randzonenveränderungen verursacht wird.

Die im Rahmen tribologischer Untersuchungen im skalierten Modus gewonnenen Erkenntnisse weisen darauf hin, dass mit hohen Maßen der thermischen Randzonenbeeinflussung ein größerer Schienenverschleiß generiert wird, was mit großer Wahrscheinlichkeit zur Reduktion der betrieblichen Schienenliegedauer führen würde. Als Zahlenwert für ein hohes Maß der thermischen Randzonenbeeinflussung wurde die Härtungstiefe von CHD HV 0,3 ≥ 20 μm identifiziert. Die durch das Schleifen erzeugten WEL martensitischer Grundstruktur können unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse eindeutig als Schädigungen bezeichnet werden. Aus diesem Grund sollen die Schienenschleifprozesse hin zu Vermeidung der WEL und Reduktion der Energie- und Wärmeenerzeugung optimiert werden, um eine möglichst geringe thermischen Beeinflussung des Ausgangszustandes des Gefüges zu erzielen. Als Schädigungsgrenzen für die Schienenrandzone und Prozessüberwachung wurden konkrete Kennzahlen definiert, die zur Bewertung der Bearbeitungsqualität herangezogen werden können. Als Grenzwert für den Randzonenzustand der Schienen nach dem Schleifen wird die maximale Amplitude des Barkhausen-Rauschens demnach $M_{\text{max}} = 470$ mA empfohlen. Die kontakflächenbezogene Energie von $E''_c = 0,02$ kJ/mm² fließt als Grenzwert zur Ableitung der Stellgrößenbereiche beim Schleifen mit ein. Durch eine ge-

zielte Anpassung der Zustellung a_e kann auf die Veränderungen der Temperatur der Schiene reagiert werden.

Durch die umfangreichen technologischen Untersuchungen zum Schienenschleifen und Untersuchungen zum tribologischen Einsatzverhalten geschliffener Schienen können folgende Hauptaussagen getroffen werden:

- Das Schienenschleifen ist aufgrund der hohen bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_w in Kombination mit einer Trockenbearbeitung ein thermisch kritisches Verfahren.
- Der Einfluss der Schientemperatur T_s auf die Bearbeitungsergebnisse ist eindeutig und muss bei der Auslegung der Schienenschleifprozesse berücksichtigt werden.
- Die Industrieanforderung hinsichtlich der Schienenrauheit $Ra \leq 10 \mu\text{m}$ wurde stets erfüllt.
- Mit der maximalen Amplitude des Barkhausen-Rauschens M_{max} ergibt sich eine Kenngröße zur Abschätzung der durch den Schienenschleifprozess in die Schiene eingebrachten thermischen Veränderung.
- Mit einer Steigerung des Maßes der Randzonenveränderung nach dem Schienenschleifen verschlechtert sich das tribologische Einsatzverhalten der Schienen.

Im Rahmen einer abschließenden Versuchsreihe zum Schienenschleifen wurde die Übertragbarkeit erzielter Erkenntnisse in die Praxis aufgezeigt.

Ausblick

Zur weiteren Erforschung des Schienenschleifens sollten Anwendungen im Fernverkehr wie das Längs-Seiten-Planschleifen mit Topfschleifscheiben sowie das Schleifen mit profilierten Schleifwerkzeugen, untersucht werden. In Bezug auf die Schleifstellgrößen bietet insbesondere eine weitere Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit im Bereich $v_f \geq 57 \text{ m/min}$ Potenzial im Sinne einer Steigerung der Bearbeitungsproduktivität. Zur Erweiterung der Wissensbasis zum Schienenschleifen können des Weiteren der Einfluss der Schleifbearbeitung auf andere Schienenstähle, wie R320Cr und R350HT, untersucht werden. Die werkzeugseitigen Untersuchungen sollen in Richtung der weiteren Optimierung der volumetrischen Zusammensetzung sowie Kornspezifikation hin zur höheren Schädigungsarmut der Bearbeitung gehen.

Die erlangten Erkenntnisse können in die Industrienormen und Standards einfließen und zur höheren Einheitlichkeit der Schienenschleifvorgänge und Vergleichbarkeit erzielter Bearbeitungsergebnisse an unterschiedlichen Schienenstrecken landesweit dienen. Aufgrund des aufgezeigten Potenzials des Schienenschleifens zur Erzeugung von Rauheiten $Ra \leq 2 \mu\text{m}$ kann die derzeitige, eher konservative Normangabe $Ra \leq 10 \mu\text{m}$, angepasst werden, was zur Reduktion der Überfahrgeräusche beitragen würde.

11 Literatur- und Normenverzeichnis

Verzeichnis der Literaturquellen

- AND09 Andersson, E.: On the optimization of a track friendly bogie for high speed. International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (2009).
- BAU98 Baumann, G.: Untersuchungen zu Gefügestrukturen und Eigenschaften der „Weißen Schichten“ an verriffelten Schienenlaufflächen. Dissertation. Technische Universität Berlin (1998).
- BEN09 Ben Othman, Y.: Kurvenquietschen: Untersuchung des Quietschvorgangs und Wege der Minderung. Dissertation. Technische Universität Berlin (2009).
- BER15 Bernsteiner C., Müller, G., Meiergofer, A., Six, K., Künstner, D., Dietmaier, P.: Development of white etching layers on rails: simulations and experiments. 10. Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel System. Colorado Springs (2015).
- BMB05 N. N.: Innovation für die Schiene. Bahnforschungsprojekte. Bundesministerium für Bildung und Forschung (2005). S. 80 - 82.
- BOR97 Borsutzki, M: Prozessintegrierte Ermittlung der Streckgrenze und der Tiefziehkenngößen an kaltgewalztem feuerverzinkten Feiblech. Dissertation. Universität des Saarlandes (1997).
- BOW59 Bowden, F. P., Tabor, D.: Reibung und Schmierung fester Körper. Springer, Berlin (1959).
- BOW89 Bowden, A. F., Johnson, K. L.: The Influence of the strain hardening on cumulative plastic deformation in rolling and sliding line contact. Journal Mechanic Physics Solids 37 (4) (1989). S. 471 - 493.
- BOW91 Bower, A. F., Johnson, K. L.: Plastic flow and shakedown of rail surface in repeated wheel-rail contact. Wear 144 (1991). S. 1 - 18.
- BRE06 G. Brechmann: Tabellenbuch Mechatronik 4. Auflage. Westermann Schroedel Verlag, Braunschweig (2006).
- BRI82 Brinksmeier, E.: Randzonenanalyse geschliffener Werkstücke. Dissertation. Universität Hannover (1982).
- BRI91 Brinksmeier, E.: Prozess- und Werkstückqualität in der Feinbearbeitung. Habilitationsschrift. Universität Hannover (1991).
- BRI93 Brinksmeier, E., Minke, E.: High-performance surface grinding - the influence of coolant on the abrasive process. Annals of CIRP 42 (1993). S. 367 - 370.
- BRI94 Brinksmeier, E., Brockhoff, T.: Randschicht-Wärmebehandlung durch Schleifen. HTM 49 (1994). S. 327 - 330.
- BRI04 Brinksmeier, E., Heinzel, C., Böhm, C., Wilke, T.: Simulation of the temperature distribution and metallurgical transformation in grinding by using the Finite-Element-Method. Annals of WGP, Production Engineering 1 (2003). S. 9 - 16.

- BRI10 Brinksmeier, E., Heinzl, C., Wilkens, A., Giese, E.: Werkzeugseitige Temperaturmessung beim Schleifen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 64. Ausgabe (2010). S. 224 - 238.
- BRI16 Brinksmeier, E., Eckebrecht, J., Kolkwitz, B., Jermolajev, S.: Technologien zur schädigungsarmen Schleifbearbeitung. 11. Seminar „Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung. Neue Entwicklungen und Trends aus Forschung und Praxis“. Hochschule Furtwangen (2016).
- BRU99 Brunner, G.: Schleifen mit mikrokristallinem Aluminiumoxid. Dissertation. Universität Hannover (1999).
- CAR26 Carter, F. W.: On the action of a locomotive driving wheel. Pro. Roy. Soc. Long. (1926). S. 151 - 157.
- CHE15 Chen, H., Ishida, M.: Influence of surface roughness of rail formed by rail grinding on rolling contact fatigue. 10. Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel System. Colorado Springs (2015).
- CHO04 Choi, H. Z., Lee, S. W., Kim, D. J.: Optimization of cooling effect in the grinding with mist type coolant. ISAAT (2004).
- CLA82a Clayton, P., Allery, M.: Metallurgical aspects of surface damage problems in rails. Can. Metall (1982). S. 31 - 46.
- CLA82b Clayton, P., Allery, M.: Surface damage of rails. Rail Technology. Nottingham (1982). S. 179 - 192.
- CLA83 Clayton, P., Allery, M.: Surface damage phenomena in rails. Proceedings Conference of Contact Mechanics and Wear of Wheel/Rail Systems. University of Waterloo (1983). S. 419 - 443.
- CUE14 Cuervo, P., Santa, J., Toro, A.: Correlations between wear mechanisms and rail grinding operations in a commercial railroad. Tribology International 08 (2014).
- CUM15 Cummings, S., Roney, M., Li, D., Baillargeon, J.: Rail grinding practices in North America. 10. International Conference on Contact Mechanics. Colorado Springs (2015).
- CZI92 Czichos, H.: Presentation of friction and wear data. Friction, Lubrication and Wear Technology 18 (1992).
- DED72 Dederichs, M.: Untersuchungen der Wärmebeeinflussung des Werkstückes beim Flachsleifen. Dissertation. RWTH Aachen (1972).
- DEN13 Denkena, B., Ahrens, M., Fischer, R., Dagen, M., Ortmaier, T.: Abrasion monitoring and automatic chatter detection in cylindrical plunge grinding. 14. CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), Procedia CIRP 8 (2013), S. 374 - 378.
- DET16 Dethlefs, A.: Gleitschleifen. Verfahrensgrundlagen und Prozessmodellierung. Dissertation. Technische Universität Berlin (2016).
- DEY09 Dey, A., Casperson, R., Pohl, R., Thomas, H.-M.: Die Klassifizierung von Oberflächenfehlern in Schienen mit der Wirbelstromprüfung. DGZfP-Jahrestagung (2009).

- DEY11 Dey, A., Caspersson, R., Pohl, R., Thomas, H.-M., Heyder, R.: Erfahrungen mit der Wirbelstromprüfung beim Einsatz an unterschiedlichen Stahlsorten. DGZfP-Jahrestagung (2011).
- DIE86 Dieter, G. E.: Mechanical metallurgy. McGraw-Hill Series in Materials Science and Engineering (1986).
- DOB94 Dobmann, G., Meyendorf, N., Schneider, E.: Zerstörungsfreie Werkstoffcharakterisierung. 20. MPA-Seminar, Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA). Universität Stuttgart (1994).
- DOB98 Dobmann, G.: Zerstörungsfreie Charakterisierung von Werkstoffschädigung. 24. MPA-Seminar, Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA). Universität Stuttgart (1998).
- DUE96 Dürr, H.: Umweltverträgliche Schleifbearbeitung - Schleifen ohne Kühlschmiermitteln naher Zukunft denkbar. dima 7 - 8 (1996). S. 52 - 59.
- EKB14 Ekberg, A., Atesson, B., Kabo, E.: Wheel/rail rolling contact fatigue - probe, predict, prevent. Wear 314 (2014).
- ENG02 Engelhorn, R.: Verschleißmerkmale und Einsatzverhalten zweiphasig verstärkter Sol-Gel-Korunde. Dissertation. RWTH Aachen (2002).
- ERT03 Ertz, M.: Temperatur, Materialbeanspruchung und Kraftschluss im Rad-Schiene-Kontakt. Dissertation. VDI-Verlag, Berlin (2003).
- EVA04 Evans, J. R., Burstow, M. C.: GWZ pilot study task 5b. The effect of track and vehicle conditions on the risk of RCF crack initiation. AEA Technology Report (2004).
- FAH09 Fahrmeir, L., Kneib, T., Lang, S.: Regression. 2. Auflage . Berlin, Springer (2009).
- FAM14 Famurewa, S. M., Xin, T., Rantatalo, M., Kumar, U.: Optimisation of maintenance track possession time: A tamping case study. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. Journal of Rail and Rapid Transit (2014).
- FAU15 Fau, F., Smith, H., Fretwell-Smith, S., Deng, L.: Effect of grinding quality and rail hardness on flaking defect initiation on high rails. 10. Conference on Contact Mechanics and wear of Rail/Wheel System. Colorado Springs (2015).
- FEL13 Feldhusen, J., Gote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin, Springer (2013).
- FEN06 Fendrich, L.: Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Berlin, Springer (2007).
- FIE05 Fiedler, J.: Bahnwesen. Düsseldorf, Werner Verlag (2005). S. 101.
- FRI07 Frick, A., Larsson-Kraik, P.-O.: Rail grinding operations in Sweden. European Railway Review 2 (2007).
- FUN84 Funke, H.: Eisenbahnbau. Schienenschleifen. Berlin, Verlag für Verkehrswesen (1984).
- GAO01 Gao, N.: Disc machine testing to assess the life of surface-damaged railway track (2001).
Verfügbar unter: <http://eprints.soton.ac.uk/22171> (Zugriff 2014-08-22).

- GEB15 Gebhard, S.: Untersuchung des Einflusses von Dreh-, Drehfräs-, Glattwalz- sowie Schleifprozessen auf das tribologische Einsatzverhalten von Stahl am Beispiel des Rad-Schiene-Kontaktes. Dissertation. Technische Universität Berlin (2015).
- GOR11 Gorgels, W.: Entstehung und Vermeidung von Schleifbrand beim diskontinuierlichen Zahnflankenprofilschleifen. Dissertation. RWTH Aachen (2011).
- GRA99 Grassie, S. L., Saxon, M. J., Smith, J. D.: Measurement of longitudinal rail and criteria for acceptable grinding. *Journal of Sound and Vibration* 227 (1999). S. 949 - 964.
- GRA00 Grassie, S. L., Nilsson, P., Bjurstrom, K.: Alleviation of rolling contact fatigue on Sweden's malmaban. 5. International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel System (2000).
- GRA01 Graf, W.: Es geht ohne hohe Geschwindigkeiten. *Schweizer Maschinenmarkt* 18 (2001). S. 18 - 20.
- GRO00 Grohmann, H.-D., Schöch, W.: Contact geometry and surface fatigue-minimising the risk of head check formation. 5. International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel System (2000).
- GRO08 Großmann, K.; Jungnickel, G.: Thermische Modellierung von Prozesseinflüssen an spanenden Werkzeugmaschinen. *Lehre - Forschung – Praxis. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Dresden* (2008).
- GUE67 Gühring, K.: Hochleistungsschleifen - eine Methode zur Leistungssteigerung der Schleifverfahren durch hohe Schnittgeschwindigkeiten. Dissertation. RWTH Aachen (1967).
- HAN52 Hanker, R.: Eisenbahnoberbau. Berlin, Springer (1952).
- HEY14 Heymann, T.: Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannnuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen. Dissertation. Technische Universität Dortmund (2014).
- HEM07 Hempe, Th., Siefer, Th.: Schienenschleifen als Bestandteil einer technisch-wirtschaftlichen Instandhaltung. *ZEVrail Glasers Annalen* 131 (2007). S. 3 - 14. Verfügbar unter: <http://www.speno.ch/pdf/0507.pdf> (Zugriff 2013-10-10).
- HER81 Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die reine angewandte Mathematik* 92 (1881). S. 156 - 171.
- HIG98 Higgins, A.: Scheduling of railway track maintenance activities and crews. *The Journal of the Operational Research Society* 4 (1998). S. 1026 - 1033.
- HOE06 Höhn, B.-R., Kröning, M., Tobie, T., Wolter, B., Schwienbacher, S.: Ermittlung und Charakterisierung von Randzonen-Kennwerten und -Eigenschaften und deren Einfluss auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter, geschliffener Zahnräder. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 453 der FVA, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt a. M. (2006).
- IWN06 Iwnicki, S.: *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. London, Taylor & Francis (2006). S. 85 - 143.

- JOH85a Johnson, K. L.: Contact mechanics. Cambridge, Cambridge University Press (1985).
- KAL97 Kalousek, J, Magel, E.: Optimizing the wheel rail system. Rail Track Structure (1997).
- KAL13 Kalousek, J., Sropa, P., Hegelund, C.: Analysis of rail grinding tests and implications for corrective and preventive grinding. The institution of engineers, Australia National Conference (2013).
- KAP94 Kapoor, A.: A reevaluation of the life of rupture of ductile metals by cyclic plastic strain. Fatigue Fracture Engineering Materials Structure 17 (1994). S. 201 - 219.
- KAP02 Kapoor, A., Franklin, F. J., Wong, S. K., Ishida, M.: Surface roughness and plastic flow in rail wheel contact. Wear 253 (2002). S. 257 - 264.
- KAR95 Karpuschewski, B.: Mikromagnetische Randzonenanalyse geschliffener einsatzgehärteter Bauteile. Dissertation. Universität Hannover (1995).
- KIM11 Kimura, T.: Development of SP3 rail with high wear resistance and rolling contact fatigue resistance for heavy haul railways. JFE Technical Report 16 (2011). S. 32 - 37. Verfügbar unter: <http://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/016/pdf/016-10.pdf> (Zugriff 2011-10-10).
- KLO82 Klocke, F.: Gewindeschleifen mit Bornitridschleifscheiben. Dissertation. Technische Universität Berlin (1982).
- KNO01 Knothe, K.: Gleisdynamik. Ernst & Sohn, Berlin (2001). S. 9 - 61.
- KNO03 Knothe, K.: Schienenfahrzeugdynamik. Berlin, Springer (2003). S. 33.
- KOE77 König, W., Hönscheidt, W., Lowin, R.: Untersuchung der beim Schleifprozess entstehenden Temperaturen und ihre Auswirkung auf das Arbeitsergebnis. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nu. 2648. Westdeutscher Verlag (1977).
- KOE94 König, W., Treffert, C., Bücken, C.: Hochgeschwindigkeitsschleifen mit CBN ohne Kühlschmierstoff. IDR 2 (1994). S. 88 - 93.
- KRE16 Kretzschmar, M.: CO₂-Schneeentstehung und deren Wirkung auf die Effekte beim CO₂-Schneestrahlen. Dissertation. Technische Universität Berlin (2016).
- LAR04 Larsson, D. A.: Study of the track degradation process related to changes in railway traffic. Dissertation. Lulea, Sweden (2007).
- LI08 Li, C., Hou, Y., Xiu, S., Cai, G.: Application of lubrication theory to near-dry green grinding-feasibility analysis. Advanced Materials Research 44 - 46 (2005). S. 135 - 142.
- LIC05 Lichtenberger, B.: Combating rolling noise of trains by means of rail grinding. Rail Engineering International Edition 3 (2005).
- LIN06 Ling, D.J., Roy, R., Shehab, E., Jaiswal, J., Stretch, I.: Modeling the cost of railway asset renewal projects using pairwise comparisons. Journal of Rail and Rapid Transit 220 (2006). S. 331 - 346.
- LOR75 Lortz, W.: Schleifscheibentopographie und Spanbildungsmechanismen beim Schleifen. Dissertation. RWTH Aachen (1975).

- LOW80 Lowin, R.: Schleiftemperaturen und ihre Auswirkungen im Werkstück. Dissertation. RWTH Aachen (1980).
- LUD94 Ludewig, T.: Auswahlkriterien für SiC- und Korundschleifkorntypen beim Schleifen von Stählen. Dissertation. RWTH Aachen (1994).
- LUN07 Lundmark, J.: Rail grinding and its impact on the wear of wheels and rail. Dissertation. Lulea, Sweden (2007).
- MAR85 Markow, M.: Application of life-cycle costing and demand-responsive maintenance to rail maintenance of way. Transportation Research Record 1030 (1985), S. 1 - 7.
- MAR91 Marx, L., Bugenhagen, D., Maßmann, D.: Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus. Mainz, Eisenbahn-Fach-Verlag (1991). S. 29 - 49, 283 - 301.
- MAT10 Materna, J.: Trywalosci eksploatacyjna zregenerowanych szyn I rozladow kolojowych. Konferencija naukowo - techniczna "Spalnictwo drog szynowych - jakosc, niezawodnosc, bezpieczenstwo" (2010). S. 1 - 12.
- MIN04 Minke, E.: Auswirkung der Additivierung eines Schleiföls auf Prozess- und Ergebnisgrößen beim Schleifen von Schnellarbeitsstahl. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 61. Ausgabe (2004). S. 49 - 64.
- PAT07 Patra, A.: RAMS and LCC in rail track maintenance Dissertation. Lulea, Sweden (2007).
Verfügbar unter: <http://epubl.ltu.se/1402-1757/2007/57> (Zugriff 2013-10-10).
- POI00 Pointner, P.: Auswirkungen des Rad-Schiene Kontaktes auf Werkstoffwahl und Fahrweggüte. Eisenbahningenieur 51 (2000). S. 122 - 126.
- PON85 Ponter, R. S., Hearle, A. D., Johnson, K. L.: Application of the kinematical shakedown theorem to rolling and sliding point contact. Journal Mechanic Physics Solids 33 (1985). S. 339 - 362.
- POP03 Popp, K., Schiehlen, W.: System dynamics and long-term behavior of railway vehicles, track and subgrade. Berlin, Springer (2003). S. 52 - 61.
- PRI72 Prins, J. F.: Wechselwirkung zwischen Diamanten und Stahl in Einkornritzversuchen. Diamant-Information 24 (1972). S. 3 - 11.
- PRO86 Proceedings of Third International Heavy Haul Association Conference (1986).
- SCH00 Schnitzer, T.: Bruchmechanische Analyse der Rissausbreitung durch Rollkontaktermüdung. Internationales Symposium „Schienefehler“. Fachhochschule Brandenburg (2000).
- SCH07 Schöch, W.: Specification and documentation of rail grinding work in Europe. Interface Journal 7 (2007).
- SCH08a Schvienbacher, S.: Einfluss von Schleifbrand auf die Flankentragfähigkeit ein-satzgehärteter Zahnräder. Dissertation. Technische Universität München (2008).
- SCH08b Schöch, W.: Entwicklung von Schleifstrategie gegen Rollkontaktermüdung - ein internationaler Überblick. ZEVrail Glasers Annalen 132 (2008).
- SCH10 Schmid, F.: Best praxis in wheel-rail interface management for mixed traffic railways. Birmingham, University of Birmingham Press (2010). S. 6 - 23.

- SHA14 Shao, Y., Liang, S.: Predictive force modeling in MQL (minimum quantity lubrication) grinding. ASME Paper No. MSEC2014-3971 (2014).
- SIL05 Silva, L., Bianchi, E., Catai, R., Fusse, R., Franca, T.: Study on the behavior of the minimum quantity lubricant-MQL technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. International Journal for Machines and Tools in Manufacturing 47 (2005). S. 192 - 199.
- SIL15 Silva, S., Vidon, W., Rippeth, D., Caldwell, R.: Preventive-gradual on-cycle grinding: a first for MRS Brazil. 10. Conference on Contact Mechanics and wear of Rail/Wheel System, Colorado Springs (2015).
- SRO11 Sroba, P., Roney, M.: Rail grinding best practices. AREMA Conference, Chicago (2011).
- STA01 Stadlbauer, W.: Bainitic steels for rails. Dissertation. Technische Universität München (2001).
- TAK15 Takikawa, M., Aoki, F., Kobayashi, J., Ogiso, K.: Study on grinding marks and control rolling noise after grinding. 10. Conference on Contact Mechanics and wear of Rail/Wheel System, Colorado Springs (2015).
- TAP05 Tapp, C.: Mechanische Eigenschaften von Schienenstählen unter zyklischer Belastung. Dissertation. Düsseldorf, VDI-Verlag (2005).
- TAW90 Tawakoli, T.: Hochleistungs-Planschleifen. Dissertation, Universität Bremen (1990).
- TAW08 Tawakoli, T., Rabiey, M.: Trockenschleifen mit CBN-Schleifscheiben - ein innovatives Konzept. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen (2008). S. 100 - 118.
- TAW09 Tawakoli, T., Hadad, M., Sedeghi, M., Daneshi, A., Stockert, S., Rasifard, A.: An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal for Machines and Tools for Manufacturing 49 (2009). S. 924 - 932.
- TAW10 Tawakoli, T., Hadad, M., Sedeghi, M.: Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal for Machines and Tools for Manufacturing 50 (2010). S. 521 - 531.
- THE82 Theiner, W.A; Höller, P.: Magnetische Verfahren zur Spannungsermittlung, Eigenspannungen und Lastspannungen. München, Carl Hanser Verlag (1982).
- THO03 Thompson, D. J., Monk-Steel, A. D.: A theoretical model for curve squeal. Report prepared for the UIC project Curve Squeal. WP4A (2003).
- THY12 <http://tkgftgleistechnik.de/oberbauhandbuch.html> (Zugriff: 2014-06-18).
- TOE95 Tönshoff, K.-H.: Spanen - Grundlagen. Berlin, Springer (1995).
- TYF95 Tyfour, W. R., Beynon, J. H., Kapoor, A.: The study state wear behavior of perlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions. Wear 180 (1995). S. 79 - 89.
- TYF96 Tyfour, W. R., Beynon, J. H., Kapoor, A.: Deterioration of rolling contact fatigue life of perlitic steel due to dry-wet rolling-sliding line contact. Wear 197 (1996). S. 255 - 265.

- UHL94 Uhlmann, E.: Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe. Dissertation. Technische Universität Berlin (1994).
- UHL97 Uhlmann, E., Stark, C.: Potentiale von Schleifwerkzeugen mit mikrokristalliner Aluminiumoxidkörnung. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen. Essen (1997)
- UHL12 Uhlmann, E., Lypovka, P.: Heile Schienen, sicherer Verkehr. FUTUR 3 (2012). S. 22 - 23.
- UHL13a Uhlmann, E., Lypovka, P.: Freie Fahrt für Straßenbahnen. Schienen effizient schleifen. FUTUR 1 (2013). S. 14 - 15.
- UHL13b Uhlmann, E., Lypovka, P.: Der beste Schliff. Instandhaltung 8 (2013).
- UHL13c Uhlmann, E., Hochschild, L.: Tool optimization for high speed grinding. Production Engineering 7 (2013), S. 185 - 193.
- UHL13d Uhlmann, E., Hasper, G., Heitmüller, F.: Verschleißmodell für Sinterkorundschleifscheiben. wt Werkstatttechnik online 6 (2013). S. 511 - 516.
- UHL14a Uhlmann, E., Lypovka, P.: Analyse der Randzonenbeschaffenheit beim Schienenschleifen. wt-online 8 (2014).
- UHL14b Uhlmann, E., Lypovka, P.: Auswirkung unterschiedlicher Schienenschleifprozesse auf die Schienenrandzone. Ingenieurspiegel 05 (2014).
- UHL15a Uhlmann, E., Lypovka, P.: Influence of track grinding process on rail surface and subsurface topology. Proceedings of 10. International Conference on Contact Mechanics in Rail/Wheel Contact, Colorado Springs (2015).
- UHL15b Uhlmann, E., Lypovka, P.: Auswirkung unterschiedlicher Schienenschleifprozesse auf die Schienenrandzone. Vortrag auf der Internationalen Schienenfahrzeugtagung, Dresden (2015).
- UHL16a Uhlmann, E., Lypovka, P.: Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness. Wear CM 2015 Special Issue (2016).
- VAL10 Vale, C., Ribeiro, I., Calçada, R.: Application of a maintenance model for optimizing tamping on ballasted tracks: the influence of the model constraints. 2. International Conference on Engineering Optimization. Lissabon (2010).
- VEI07 Veit, P.: Track Quality - Luxury or Necessity? RTR Special (2007).
- VOL89 Vollertsen, F., Vogler, S.: Werkstoffeigenschaften und Mikrostruktur. München, Carl Hanser Verlag (1989).
- VOL00 Voll, M.: Modelle zur thermischen Optimierung von Trockenschleifprozessen. Dissertation. Fraunhofer IWU (2000).
- WAL91 Walf, K.: Zur Bildung von Riffeln auf Schienenfahrflächen. Dissertation. Technische Universität Berlin (1991).
- WEB02 Webster, J., Brinksmeier, E., Heinzl, C., Wittmann, M., Thöns, K.: Assessment of grinding fluid effectiveness in continuous-dress creep feed grinding. Annals of CIRP 51 (2002). S. 235 - 240.

- WER97 Werner, G.: Schneller Abtrag und hohe Bearbeitungsgüte durch innovative HEDG-Schleifprozesse. MM Maschinenmarkt 103 (1997). S 44 - 54.
- WIL08 Wild, E.: Beanspruchungsbedingte Gefügeänderungen von ferritisch-perlitischen Stählen am Beispiel des Rad-Schiene-Kontaktes. Dissertation. Technische Universität Berlin (2008).
- ZAR10 Zarembski, A., Palese, J.: Evaluation of the effectiveness of rail grinding on reducing rail defects on North American Class 1 Railroad. AREMA Conference, Chicago (2010).
- ZEP05 Zeppenfeld, C.: Schnellhubschleifen von Titanaluminiden. Dissertation. RWTH Aachen (2005).
- ZHA06 Zhao, J., Chan, A. H. C., Stirling, A. B., Madelin, K. B.: Optimizing Policies of Railway Ballast Tamping and Renewal. Transportation Research Record 1943 (2006). S. 50 - 56.

Normenverzeichnis

- GFT02 Gesellschaft für Tribologie. Arbeitsblatt 7: Tribologie, Verschleiß, Reibung. Definitionen, Begriffe, Prüfung (2002).
- DB 824.4015 Industrienorm der DB AG. Schienenbearbeitung in Gleisen durchführen.
- DB 824.5520 Industrienorm der DB AG. Schweiß- und schleiftechnische Instandsetzung von Gleis- und Weichenschienen.
- DB 824.5520Z01 Industrienorm der DB AG. Anweisung für die Reparatur von starren Herzstücken mit Rissen und für die Beseitigung von Fehlern in Schienen mittels Hochgeschwindigkeitsfräsern..
- DB 824.8210 Industrienorm der DB AG. Abnahme von Verbindungsschweißungen an Schienen.
- DIN EN 10328 DIN-Norm. Eisen und Stahl - Bestimmung der Einhärtungstiefe nach dem Randschichthärten.
- DIN EN 13674 DIN-Norm. Bahnanwendungen - Oberbau - Schienen. Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m.
- DIN EN 13848 DIN-Norm. Bahnanwendungen - Oberbau - Gleislagequalität. Teil 1: Beschreibung der Gleisgeometrie.
- DIN EN 15302 DIN-Norm. Bahnanwendungen - Verfahren zur Bestimmung der äquivalenten Konizität.
- DIN EN 15594 DIN-Norm. Bahnanwendungen - Aufarbeiten von Schienen durch elektrisches Lichtbogenauftragschweißen.
- DIN EN 14587 DIN-Norm. Bahnanwendungen - Oberbau - Abbrennstumpfschweißen von Schienen. Teil 1: Schweißen neuer Schienen der Stahlsorte R220, R260, R260Mn und R350HT in einer stationären Anlage.
- DIN 31051 DIN-Norm. Grundlagen der Instandhaltung.

DIN 8589	DIN-Norm. Fertigungsverfahren Spanen.
DIN 50320	DIN-Norm. Verschleiß: Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes.
DIN EN ISO 2639	DIN-Norm. Stahl - Bestimmung und Prüfung der Einsatzhärtungstiefe.
DIN EN ISO 14577	DIN-Norm. Metallische Werkstoffe - Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter.
GOST 26614	GOST-Norm. Powder antifriction materials. Test method for determination of tribotechnical properties.
VDI 2221	VDI-Richtlinie. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.

Verzeichnis der Firmenschriften

FRA07	Prüfsystem 3MAII. Benutzerhandbuch. Fraunhofer IZFP (2007).
-------	---

12 Anhang

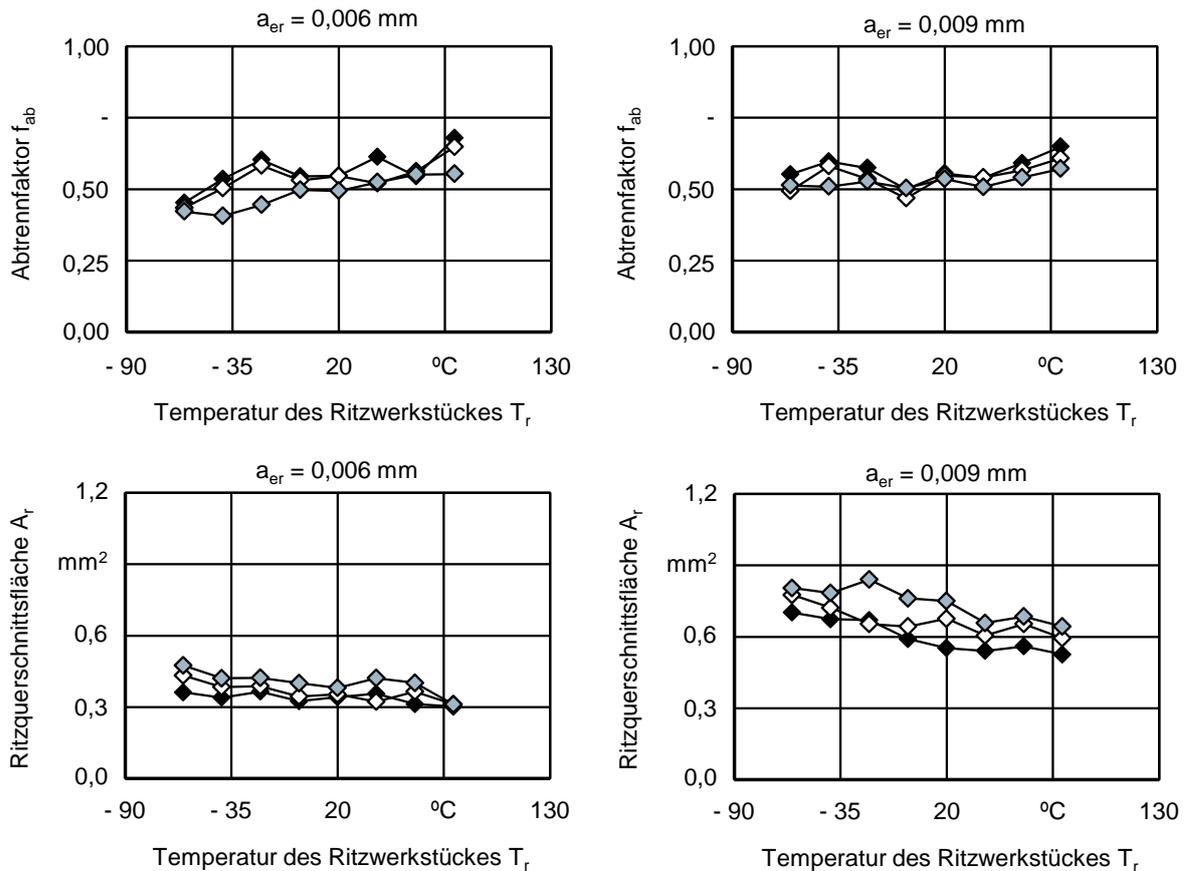
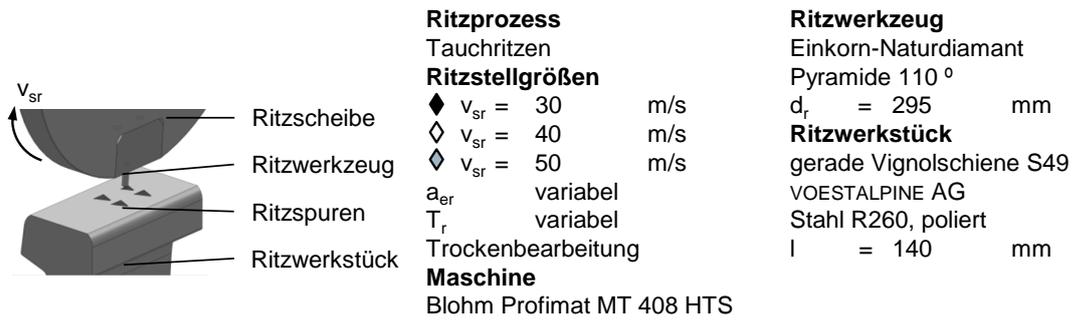


Bild 12-1: Einfluss der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r sowie der Ritzstellgrößen Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Ritzzustellung a_{er} auf den Abtrennfaktor f_{ab} und die Ritzquerschnittsfläche A_r

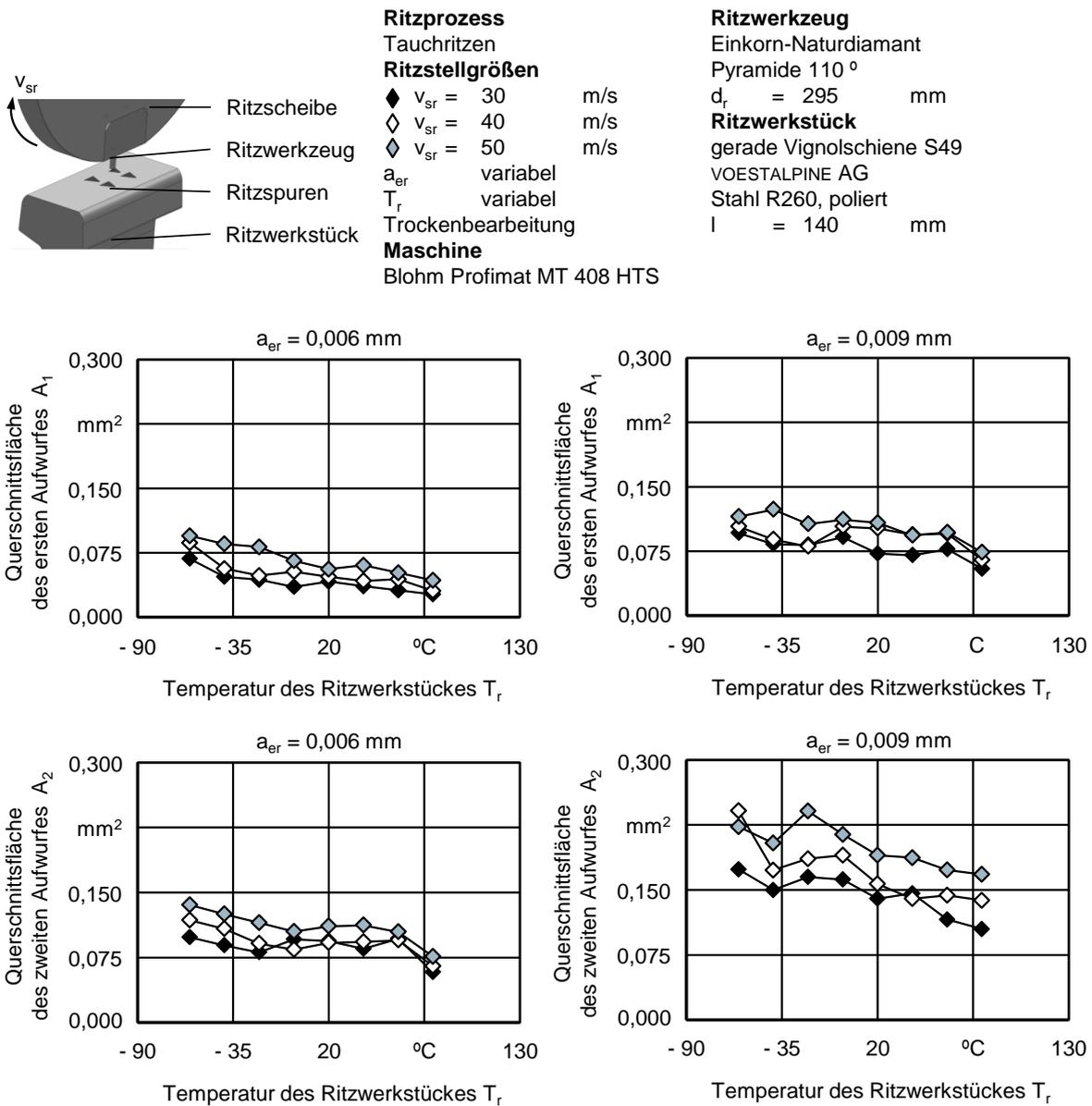


Bild 12-2: Einfluss der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r sowie der Ritzstellgrößen Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Ritzstellung a_{er} auf die Querschnittsflächen des ersten und zweiten Aufwurfes A_1 und A_2

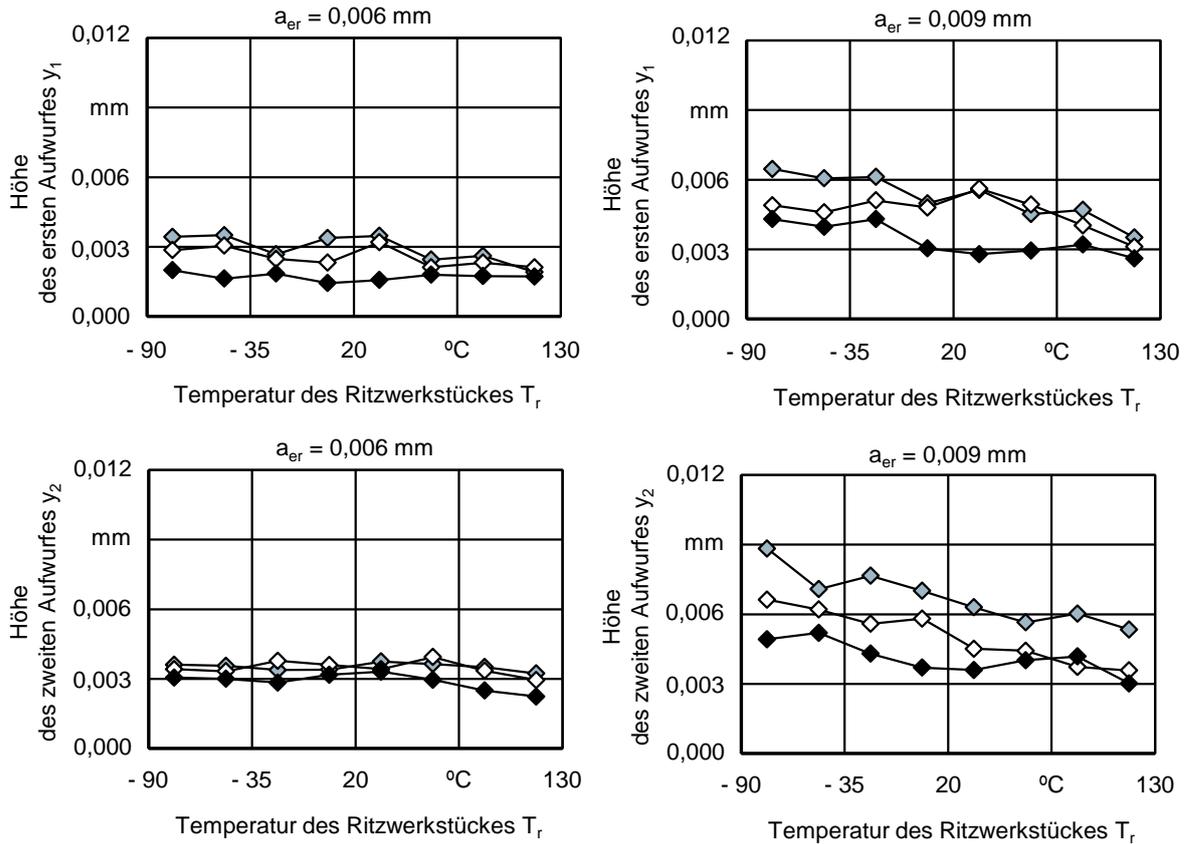
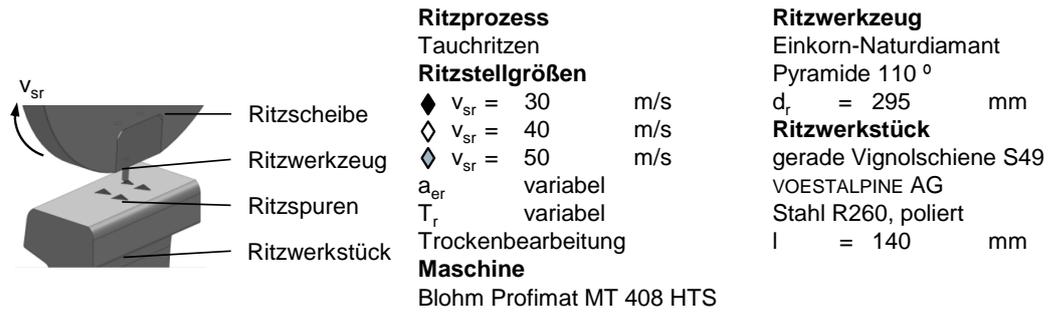


Bild 12-3: Einfluss der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r sowie der Ritzstellgrößen Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Ritzzustellung a_{er} auf die Höhen des ersten und zweiten Aufwurfes y_1 und y_2

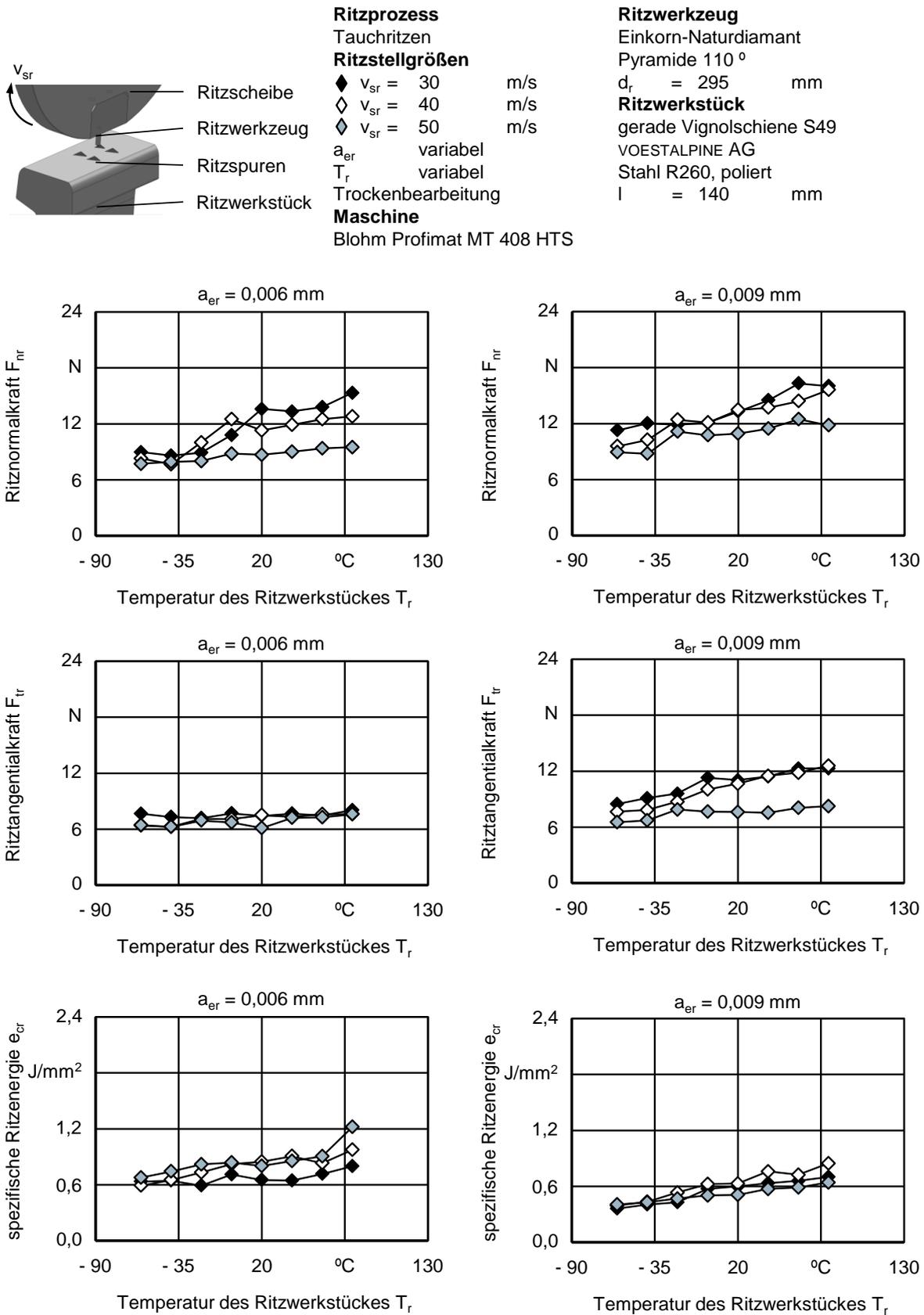


Bild 12-4: Einfluss der Temperatur des Ritzwerkstückes T_r sowie der Ritzstellgrößen Ritzumfangsgeschwindigkeit v_{sr} und Ritzzustellung a_{er} auf die Ritznormal- und Ritztangentialkräfte F_{nr} und F_{tr} sowie spezifische Ritzenergie e_{cr}

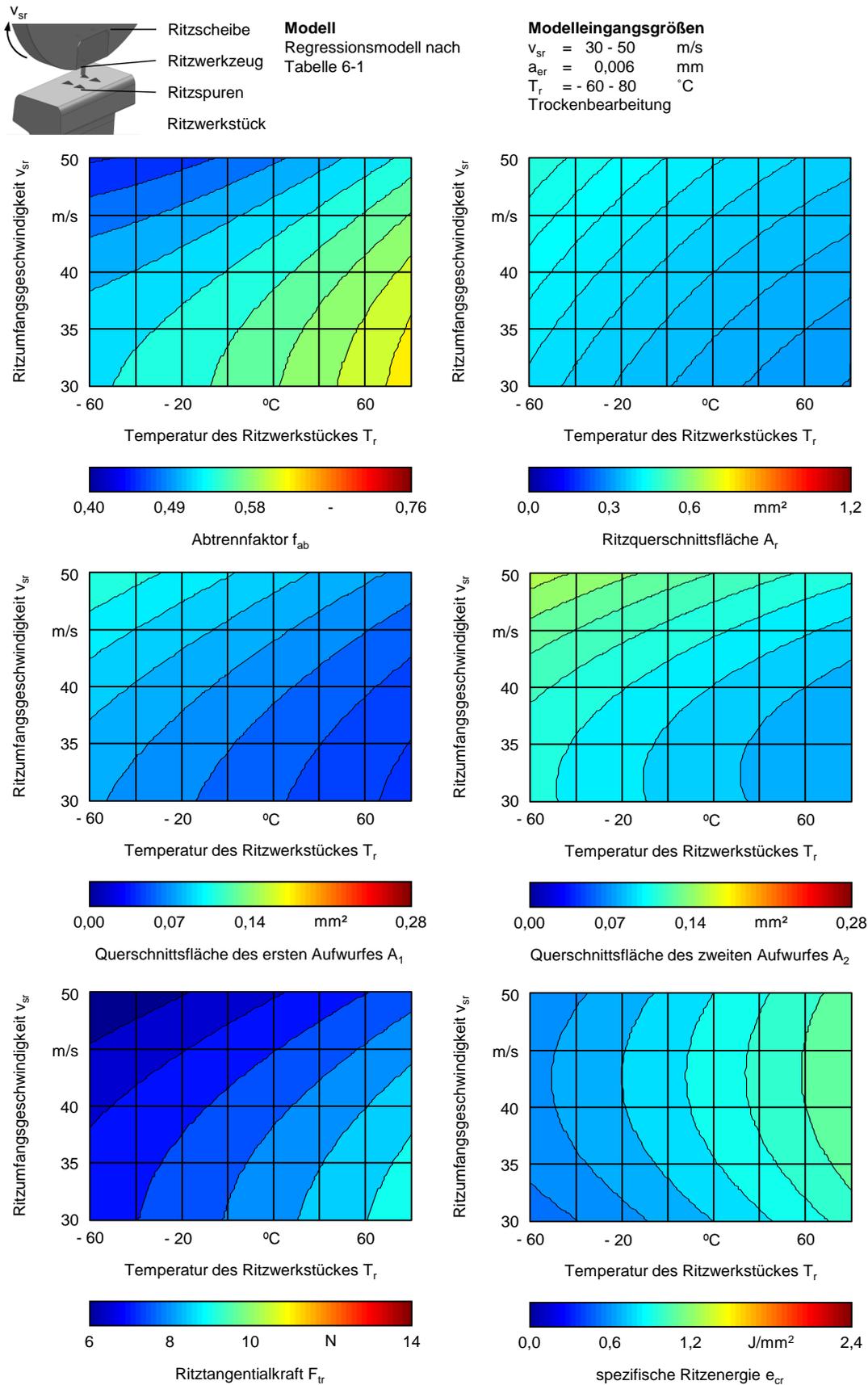
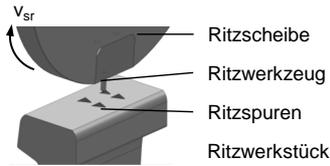


Bild 12-5: Conturplots der relevanten Zielgrößen des Regressionsmodells zur Vorhersage der Kenngrößen und Kennwerten zur Beschreibung der Spanabtrennung beim Schienenschleifen für die konstante Ritzzustellung $a_{er} = 0,006$ mm



Modell
Regressionsmodell nach
Tabelle 6-1

Modelleingangsgrößen
 $v_{sr} = 30 - 50$ m/s
 $a_{er} = 0,009$ mm
 $T_r = -60 - 80$ °C
 Trockenbearbeitung

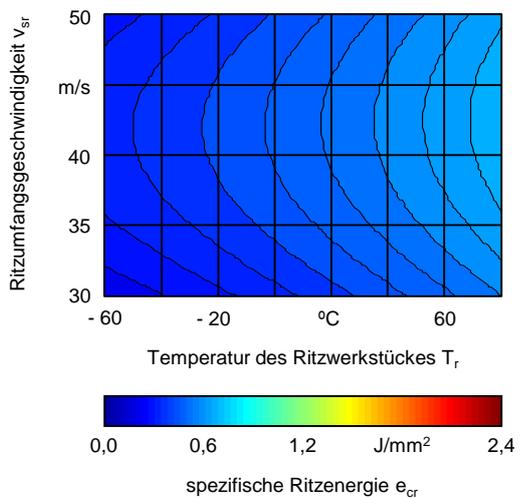
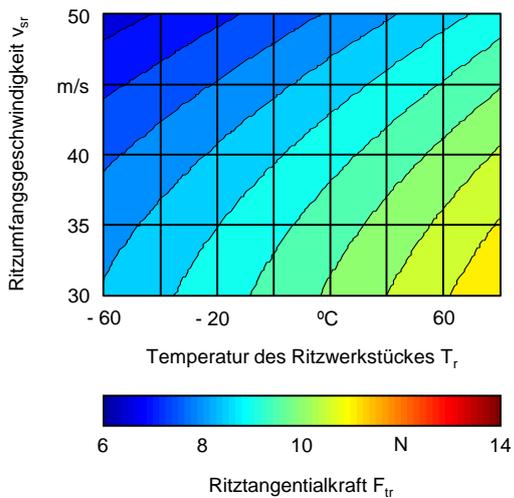
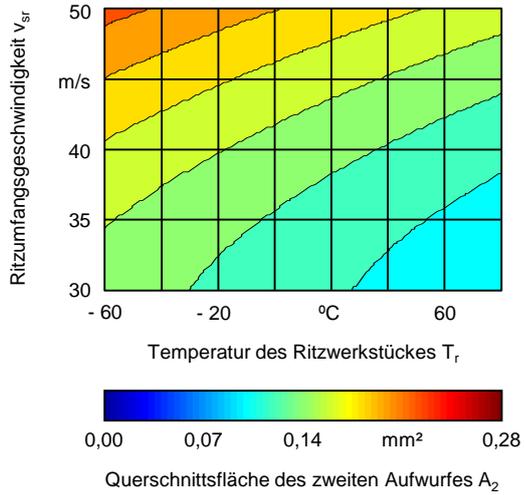
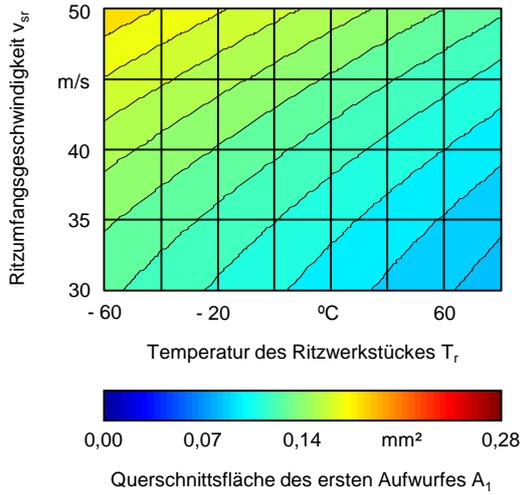
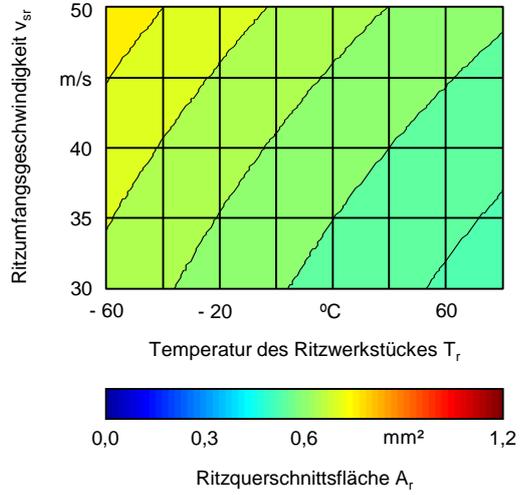
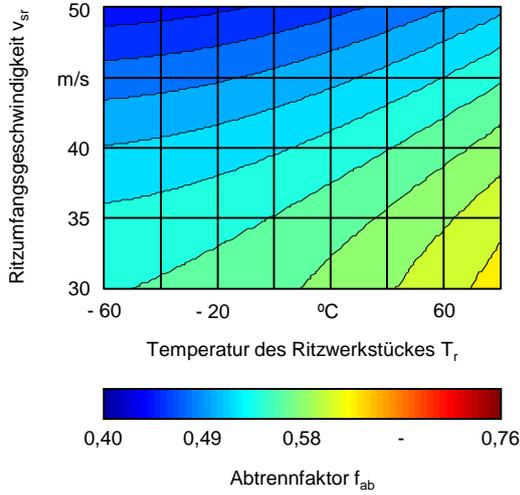
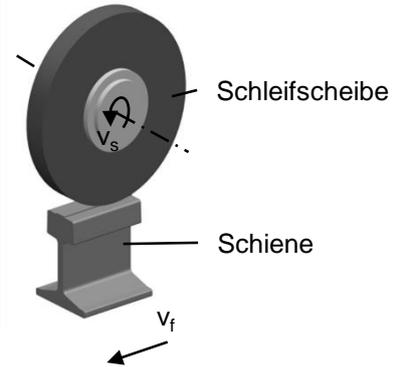
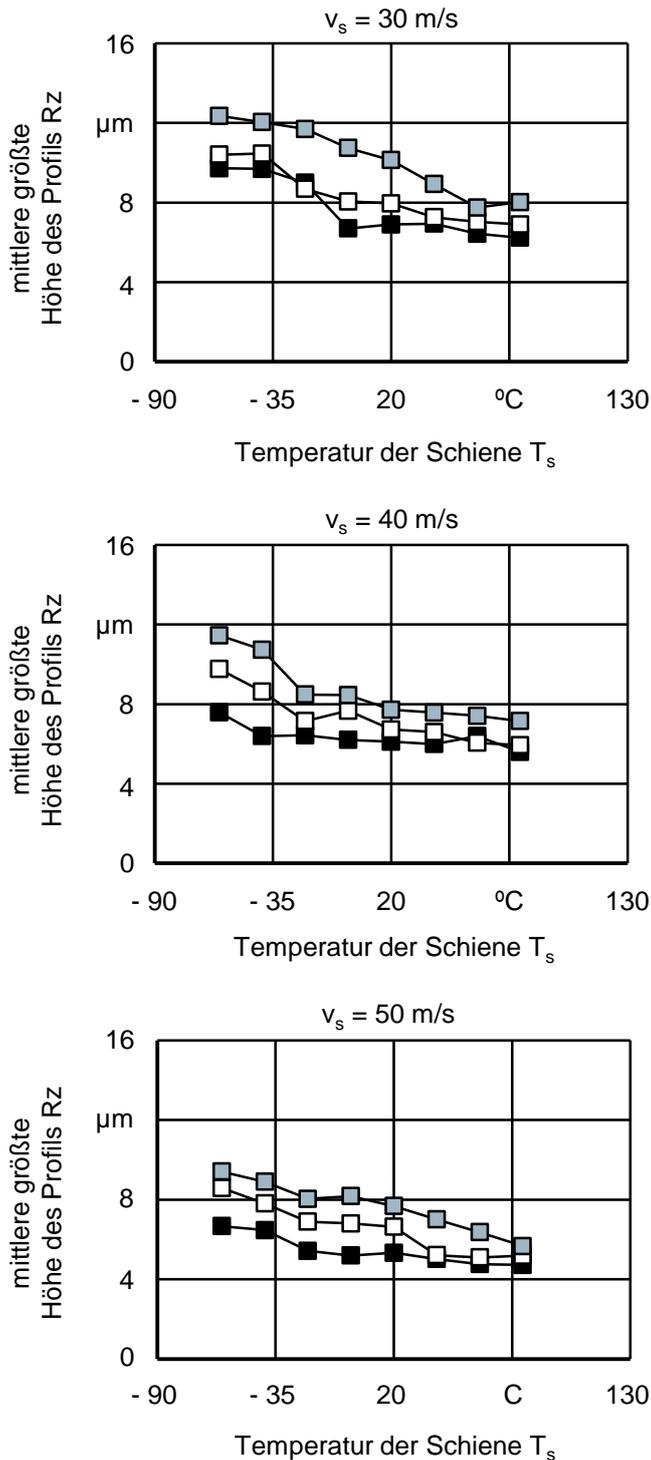


Bild 12-6: Conturplots der relevanten Zielgrößen des Regressionsmodells zur Vorhersage der Kenngrößen und Kennwerten zur Beschreibung der Spanabtrennung beim Schienenschleifen für die konstante Ritzzustellung $a_{er} = 0,009$ mm

**Schleifprozess**

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen v_s variabel■ $Q'_W = 2,57 \text{ mm}^3/\text{mms}$ □ $Q'_W = 5,14 \text{ mm}^3/\text{mms}$ ▣ $Q'_W = 7,71 \text{ mm}^3/\text{mms}$ a_e variabel $v_f = 22,00 \text{ m/min}$ $a_p = 20,00 \text{ mm}$

Gegenlauf

Trockenbearbeitung

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

zylindrische Schleifscheibe

STELLA KERAMIK

300 x 30 x 127 mm³

Korngröße 20 Mesh

100 % Schmelzkorund

Kunsthartzbindung

Härte Q (hart)

Struktur 4

Werkstück / Schiene

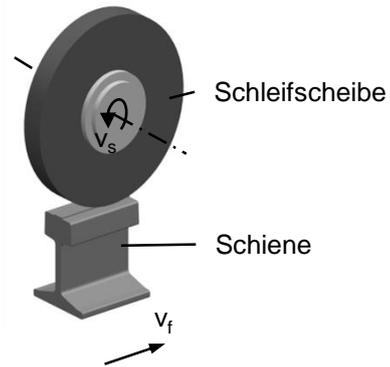
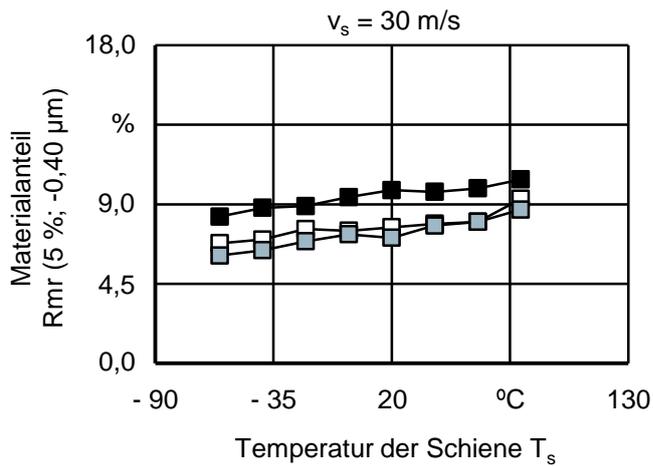
gerade Vignolschiene S49

VOESTALPINE AG

Stahl R260

 $l = 140 \text{ mm}$ T_s variabel

Bild 12-7: Einfluss variierender Schienentemperaturen und Prozessstellgrößen auf die mittlere größte Höhe des Profils Rz



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

v_s variabel
 ■ $Q'_W = 2,57 \text{ mm}^3/\text{mms}$
 □ $Q'_W = 5,14 \text{ mm}^3/\text{mms}$
 ■ $Q'_W = 7,71 \text{ mm}^3/\text{mms}$
 a_e variabel
 $v_f = 22,00 \text{ m/min}$
 $a_p = 20,00 \text{ mm}$

Gegenlauf

Trockenbearbeitung

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

zylindrische Schleifscheibe
 STELLA KERAMIK
 $300 \times 30 \times 127 \text{ mm}^3$
 Korngröße 20 Mesh
 100 % Schmelzkorund
 Kunstharzbindung
 Härte Q (hart)
 Struktur 4

Werkstück / Schiene

gerade Vignolschiene S49
 VOESTALPINE AG
 Stahl R260
 $l = 140 \text{ mm}$
 T_s variabel

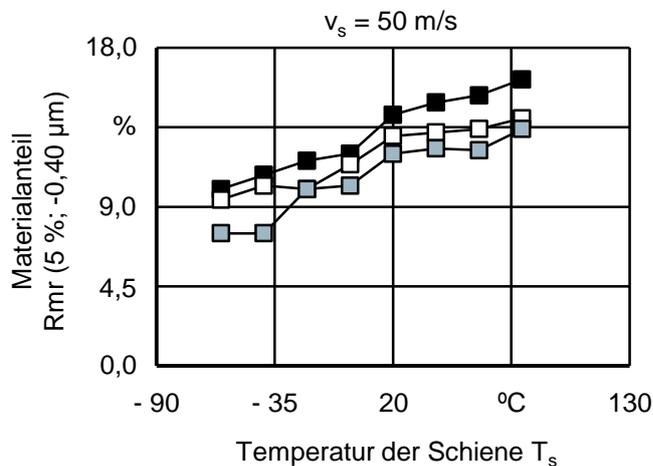
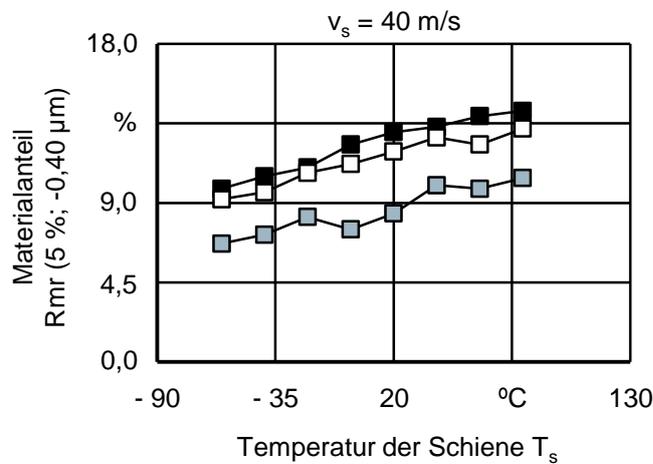
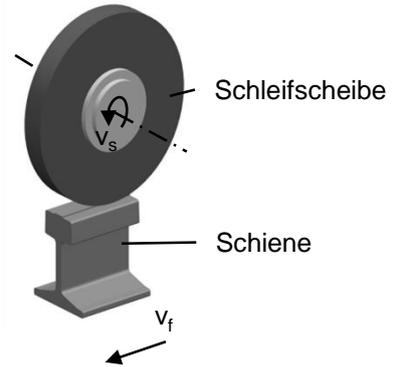
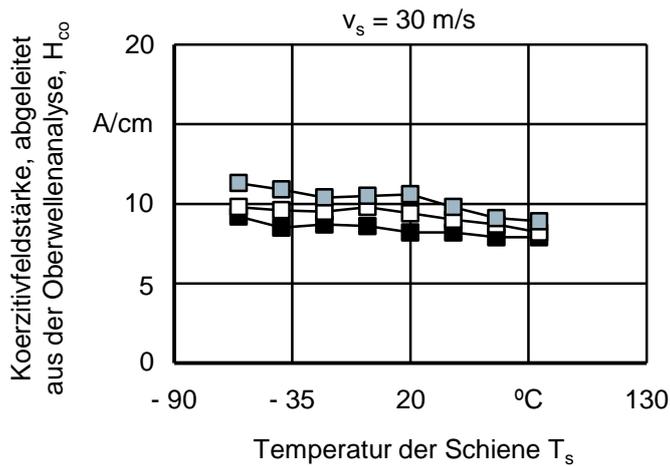


Bild 12-8: Einfluss variierender Schienentemperaturen und Prozessstellgrößen auf den Materialanteil Rmr (5 %; -0,40 µm)

**Schleifprozess**

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

v_s	variabel
■ Q'_w	= 2,57 mm ³ /mms
□ Q'_w	= 5,14 mm ³ /mms
■ Q'_w	= 7,71 mm ³ /mms
a_e	variabel
v_f	= 22,00 m/min
a_p	= 20,00 mm

Gegenlauf

Trockenbearbeitung

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

zylindrische Schleifscheibe

STELLA KERAMIK

300 x 30 x 127 mm³

Korngröße 20 Mesh

100 % Schmelzkorund

Kunstharzbindung

Härte Q (hart)

Struktur 4

Werkstück / Schiene

gerade Vignolschiene S49

VOESTALPINE AG

Stahl R260

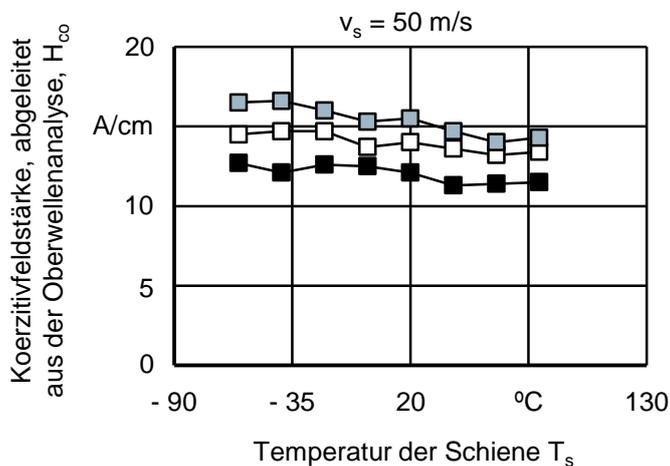
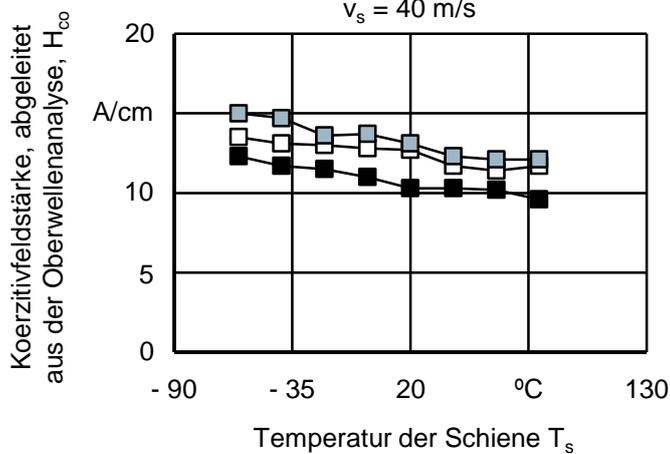
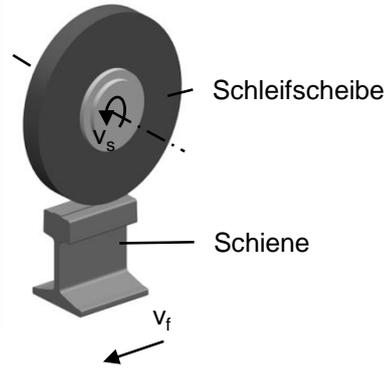
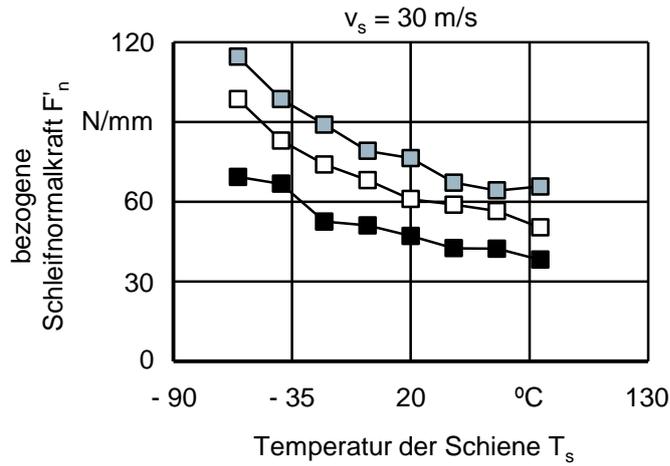
 l = 140 mm T_s variabel

Bild 12-9: Einfluss variierender Schientemperaturen und Prozessstellgrößen auf die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co}



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

- v_s variabel
- $Q'_W = 2,57 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- $Q'_W = 5,14 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- $Q'_W = 7,71 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- a_e variabel
- $v_f = 22,00 \text{ m/min}$
- $a_p = 20,00 \text{ mm}$

Gegenlauf

Trockenbearbeitung

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

- zylindrische Schleifscheibe
- STELLA KERAMIK
- $300 \times 30 \times 127 \text{ mm}^3$
- Korngröße 20 Mesh
- 100 % Schmelzkorund
- Kunsthartzbindung
- Härte Q (hart)
- Struktur 4

Werkstück / Schiene

- gerade Vignolschiene S49
- VOESTALPINE AG
- Stahl R260
- $l = 140 \text{ mm}$
- T_s variabel

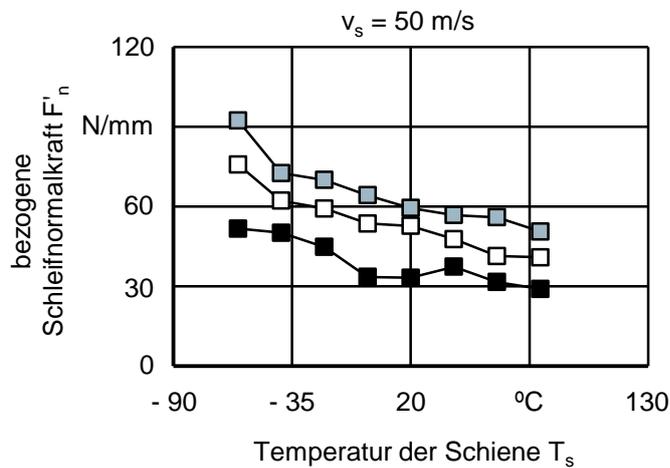
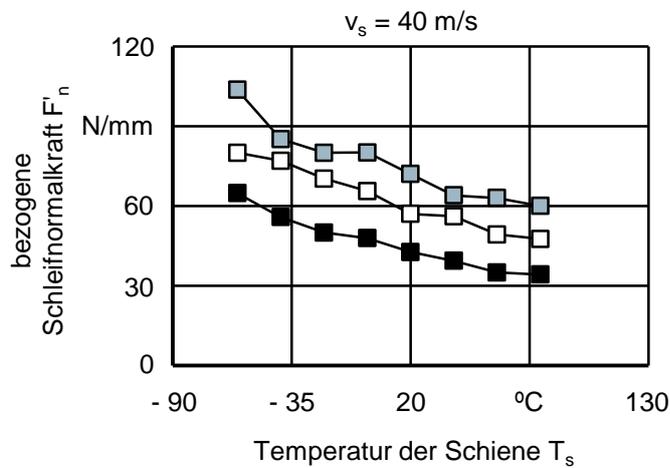
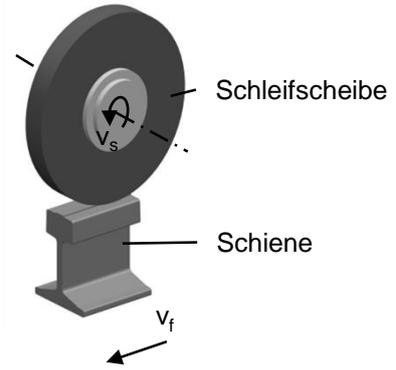
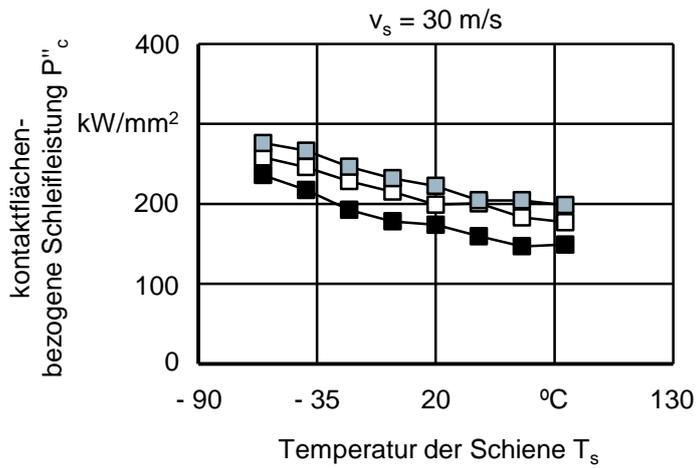


Bild 12-10: Einfluss variierender Schienentemperaturen und Prozessstellgrößen auf die bezogene Schleifnormalkraft F'_n



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

- v_s variabel
- $Q'_W = 2,57$ mm³/mms
- $Q'_W = 5,14$ mm³/mms
- ▣ $Q'_W = 7,71$ mm³/mms
- a_e variabel
- $v_f = 22,00$ m/min
- $a_p = 20,00$ mm

Gegenlauf

Trockenbearbeitung

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

- zylindrische Schleifscheibe
- STELLA KERAMIK
- 300 x 30 x 127 mm³
- Korngröße 20 Mesh
- 100 % Schmelzkorund
- Kunstharzbindung
- Härte Q (hart)
- Struktur 4

Werkstück / Schiene

- gerade Vignolschiene S49
- VOESTALPINE AG
- Stahl R260
- $l = 140$ mm
- T_s variabel

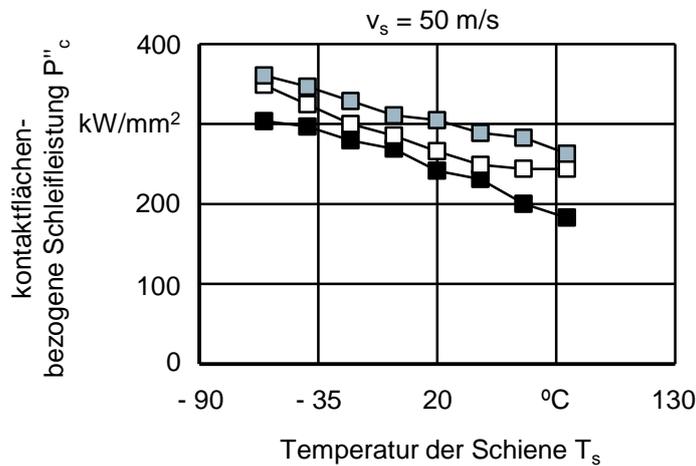
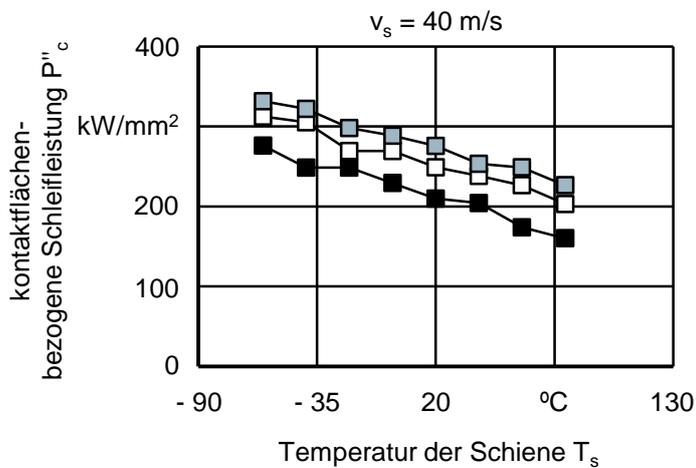
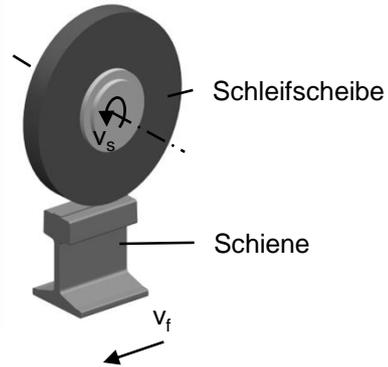
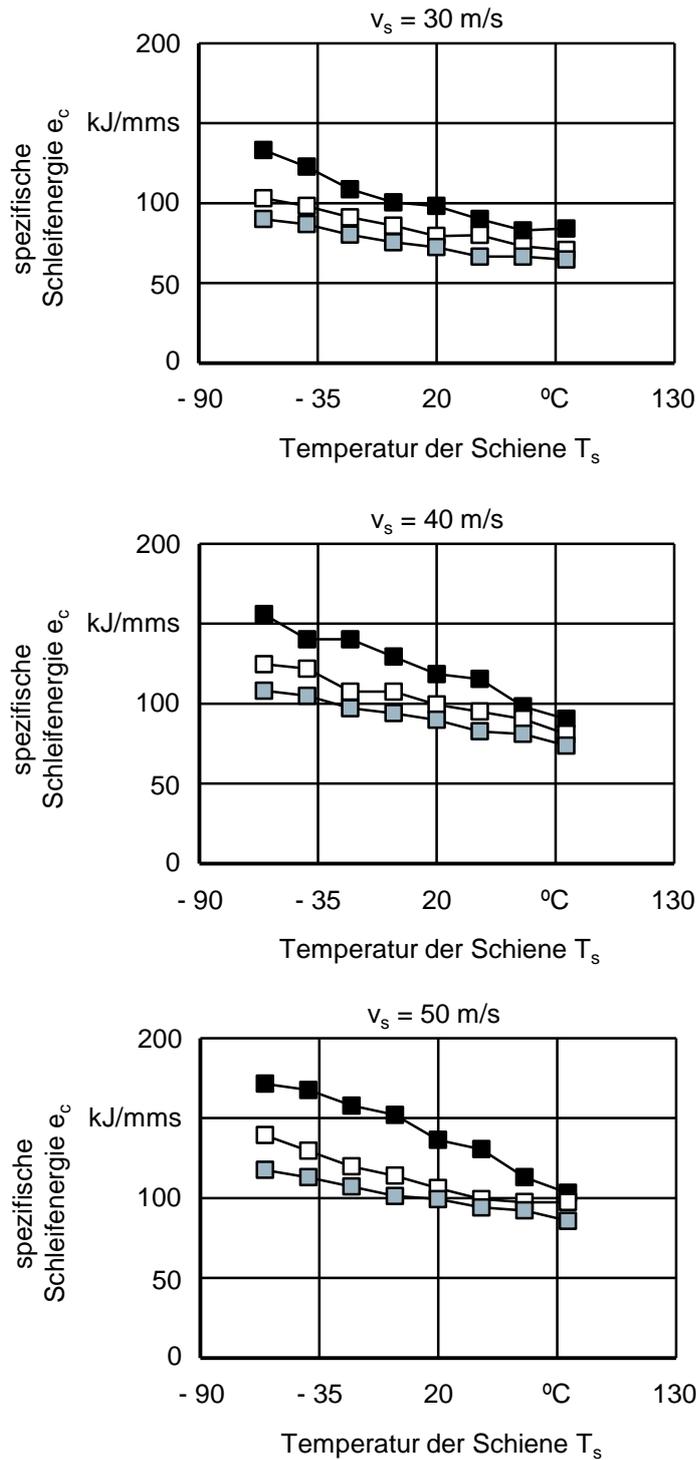


Bild 12-11: Einfluss variierender Schienentemperaturen und Prozessstellgrößen auf die kontaktflächenbezogene Schleifleistung P''_c



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

- v_s variabel
- $Q'_W = 2,57$ mm³/mms
- $Q'_W = 5,14$ mm³/mms
- ▣ $Q'_W = 7,71$ mm³/mms
- a_e variabel
- $v_f = 22,00$ m/min
- $a_p = 20,00$ mm

Gegenlauf

Trockenbearbeitung

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

- zylindrische Schleifscheibe
- STELLA KERAMIK
- 300 x 30 x 127 mm³
- Korngröße 20 Mesh
- 100 % Schmelzkorund
- Kunstharzbindung
- Härte Q (hart)
- Struktur 4

Werkstück / Schiene

- gerade Vignolschiene S49
- VOESTALPINE AG
- Stahl R260
- $l = 140$ mm
- T_s variabel

Bild 12-12: Einfluss variierender Schienentemperaturen und Prozessstellgrößen auf die spezifische Schleifenergie e_c .

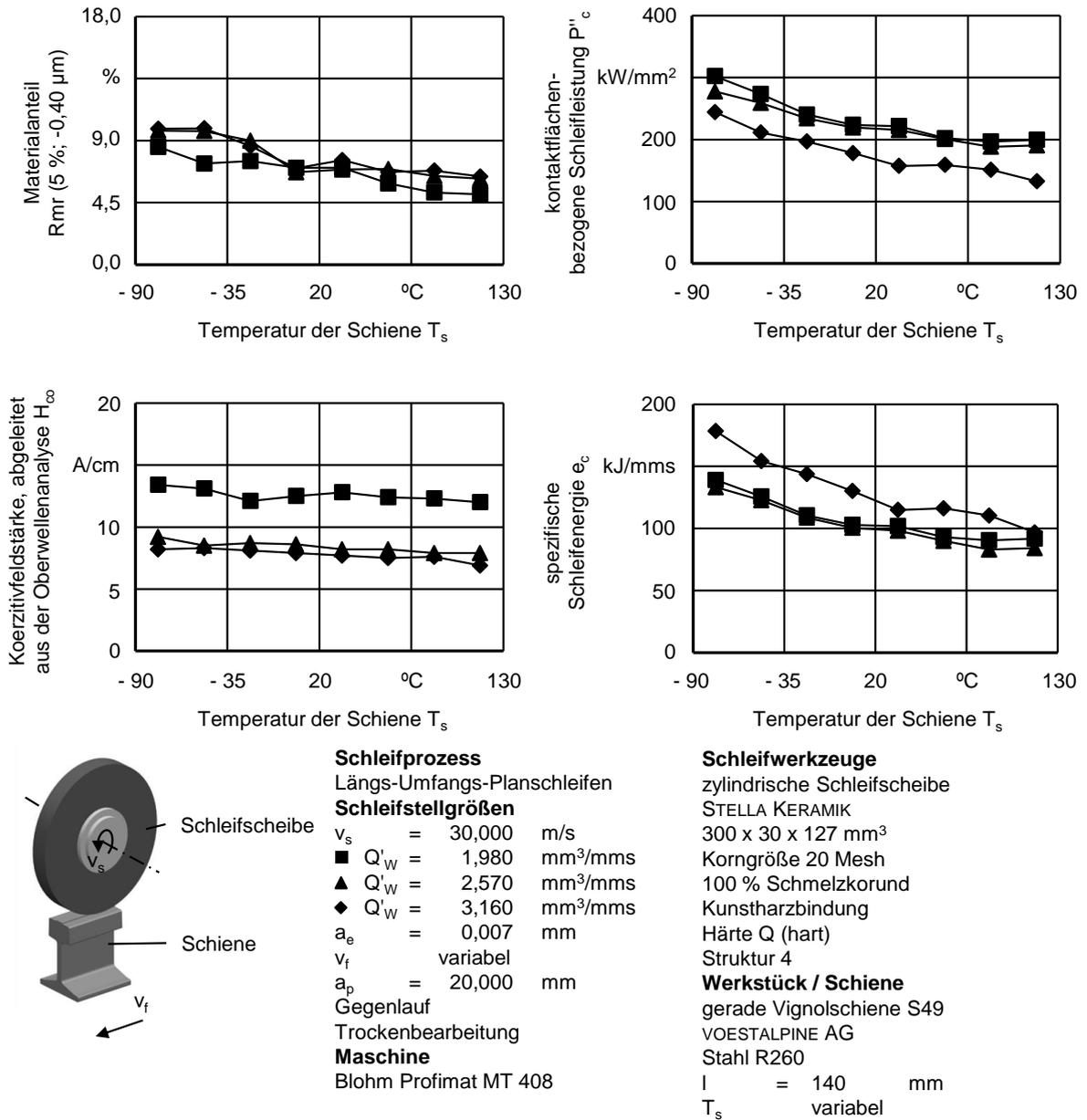


Bild 12-13: Einfluss variierender Schientemperaturen und bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_W mit veränderlichen Vorschubgeschwindigkeiten v_f auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte

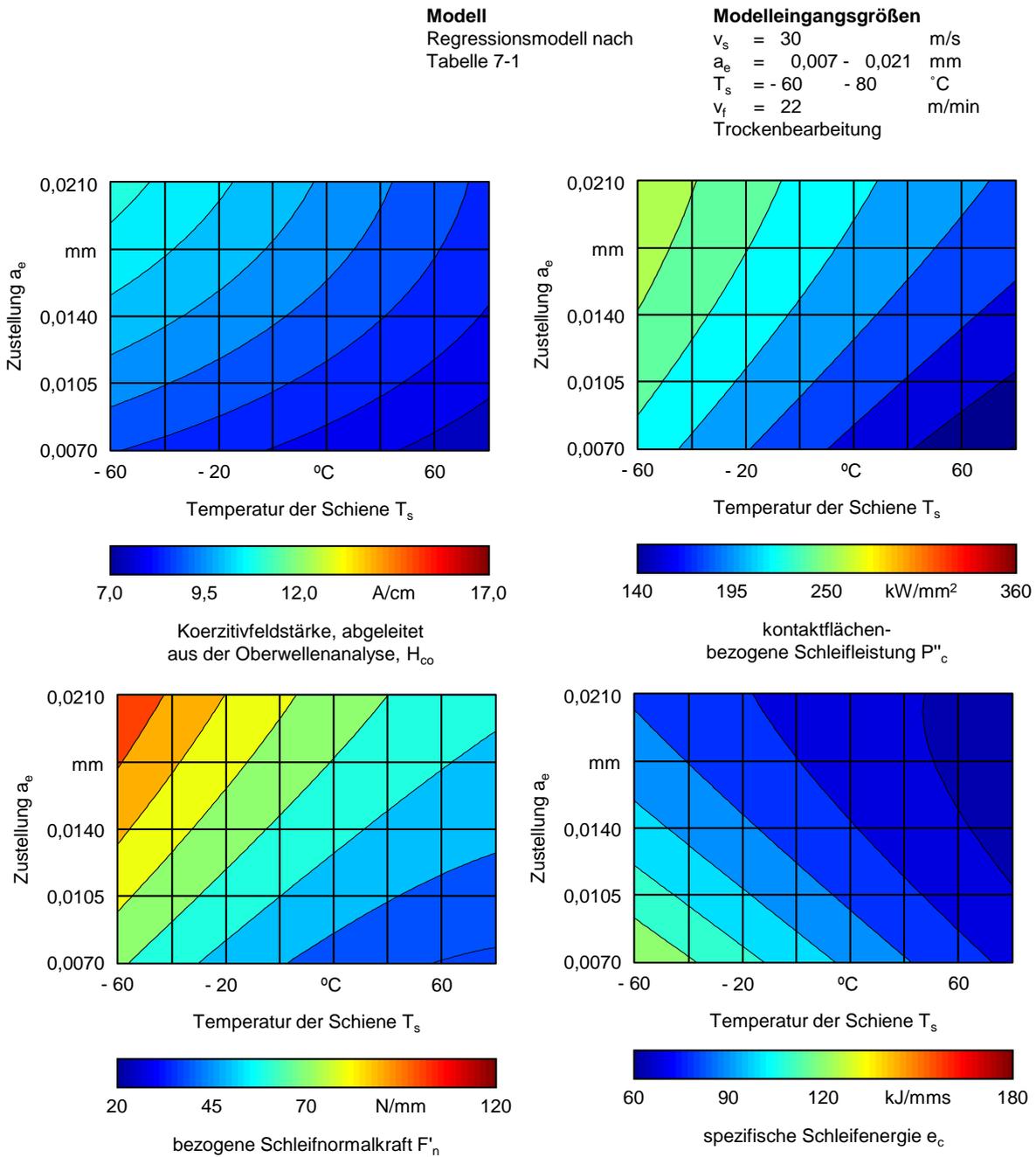


Bild 12-14: Conturplots der relevanten Zielgrößen des Regressionsmodells zur Vorhersage der Prozesskennwerte und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen für die konstante Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 30$ m/s

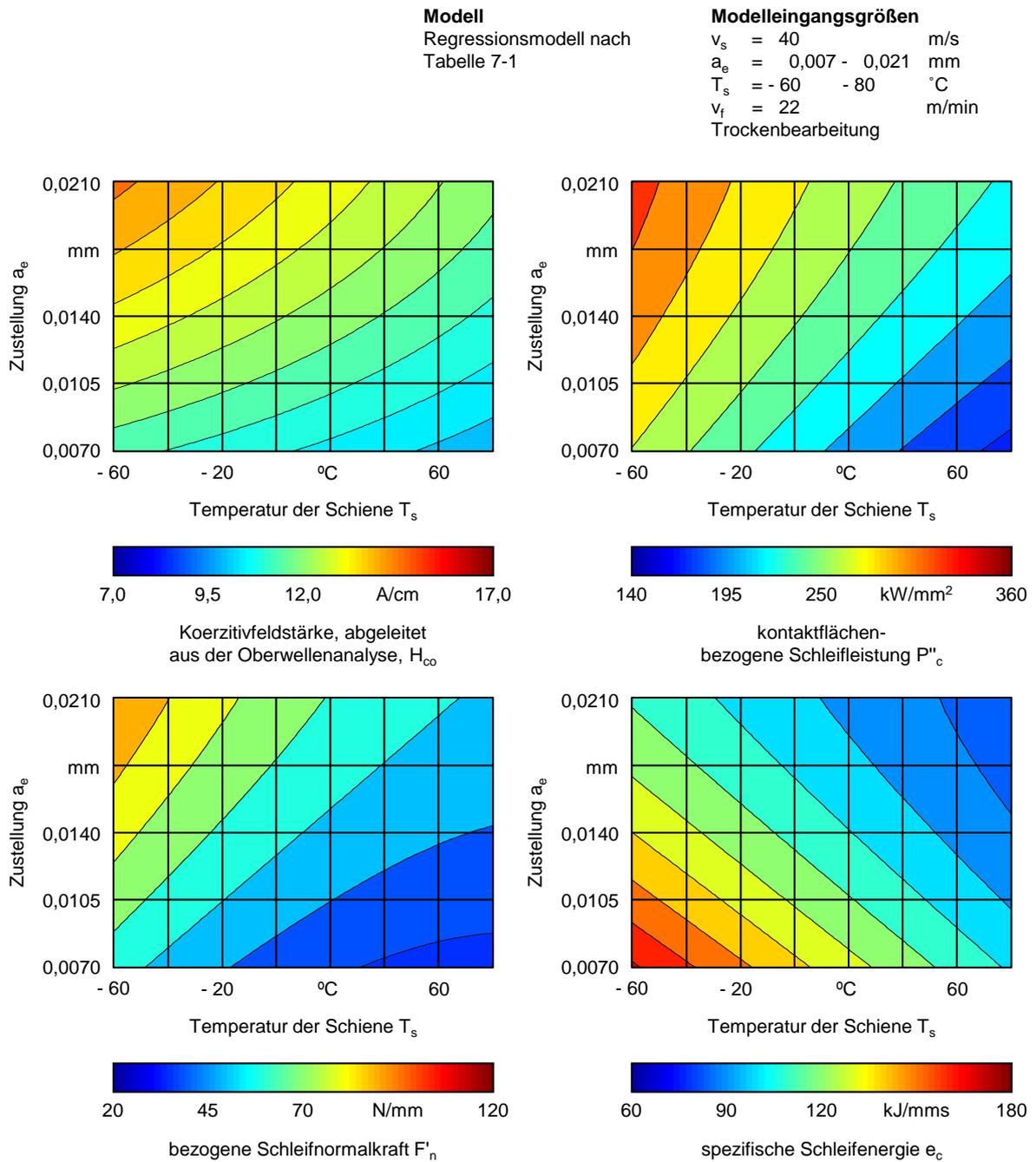


Bild 12-15: Conturplots der relevanten Zielgrößen des Regressionsmodells zur Vorhersage der Prozesskennwerte und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen für die konstante Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 40$ m/s

Modell
 Regressionsmodell nach
 Tabelle 7-1

Modelleingangsgrößen
 $v_s = 50$ m/s
 $a_e = 0,007 - 0,021$ mm
 $T_s = -60 - 80$ °C
 $v_f = 22$ m/min
 Trockenbearbeitung

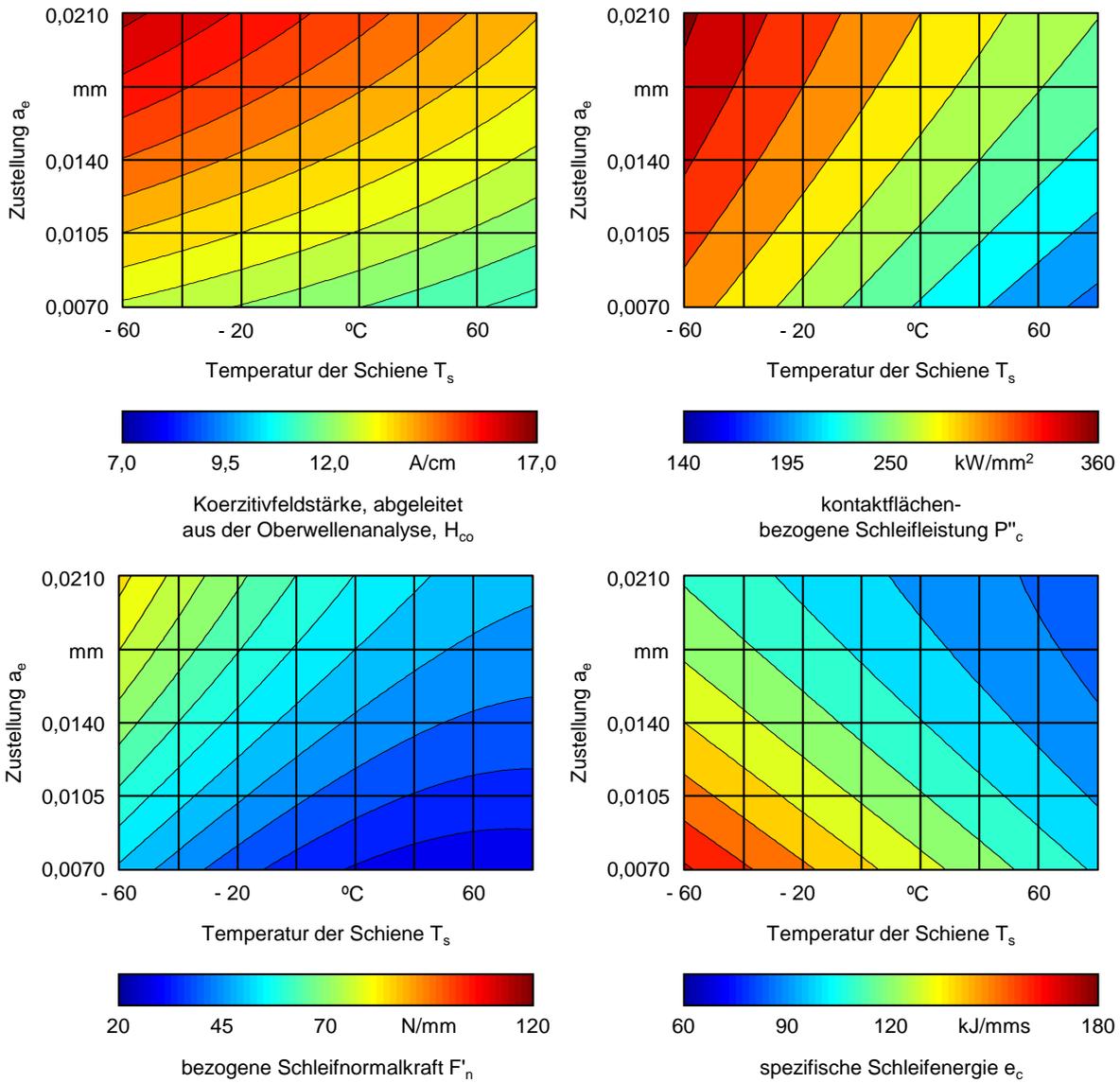
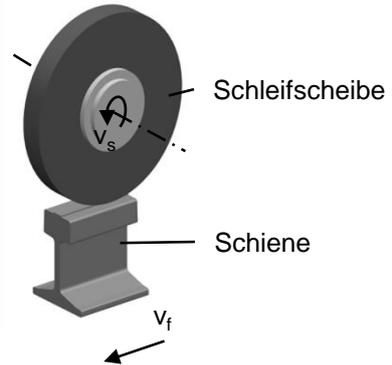
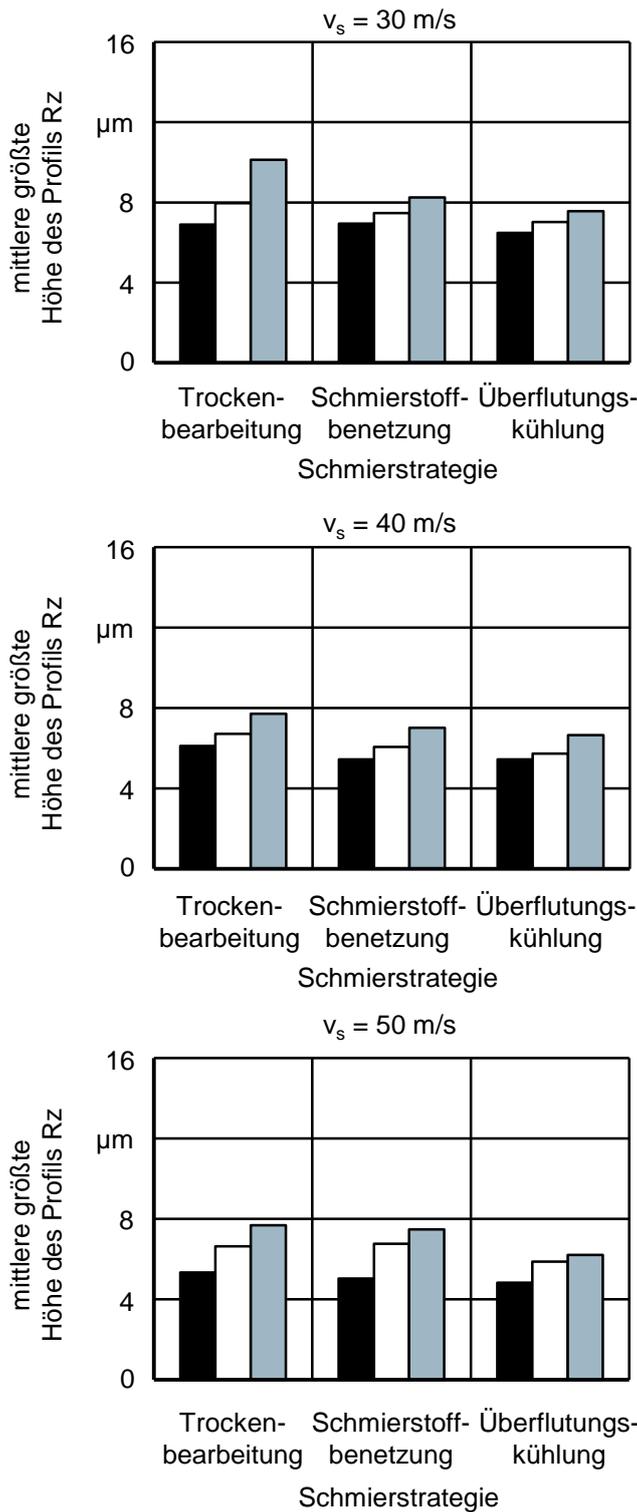


Bild 12-16: Conturplots der relevanten Zielgrößen des Regressionsmodells zur Vorhersage der Prozesskennwerte und Kenngrößen des Bearbeitungsergebnisses beim Schienenschleifen für die konstante Umfangsgeschwindigkeit $v_s = 50$ m/s



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

- v_s variabel
- $Q'_W = 2,57 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- $Q'_W = 5,14 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- $Q'_W = 7,71 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- a_e variabel
- $v_f = 22,00 \text{ m/min}$
- $a_p = 20,00 \text{ mm}$

Gegenlauf

variable Schmierstrategien

Maschine

Blohm Profimat MT 408

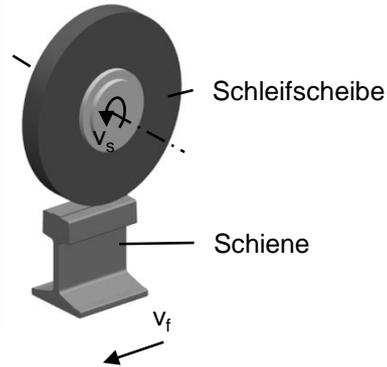
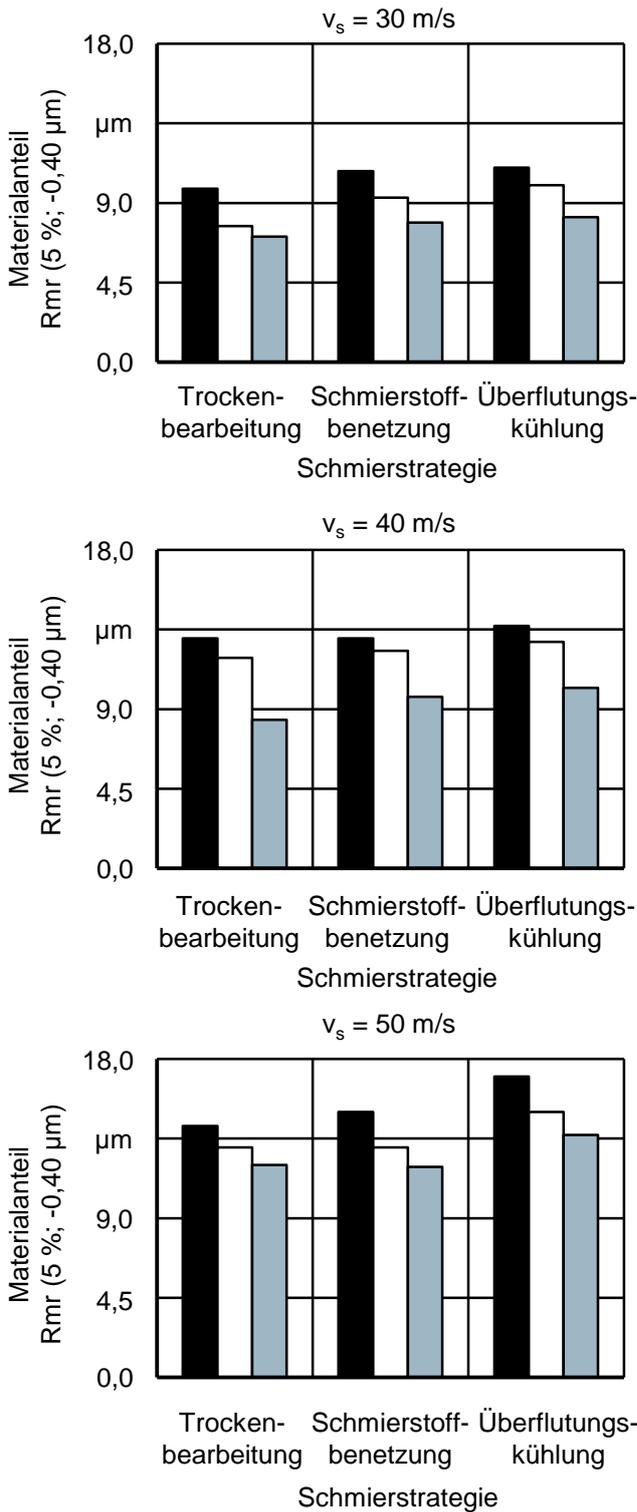
Schleifwerkzeuge

- zylindrische Schleifscheibe
- STELLA KERAMIK
- 300 x 30 x 127 mm^3
- Korngröße 20 Mesh
- 100 % Schmelzkorund
- Kunsthartzbindung
- Härte Q (hochhart)
- Struktur 4

Werkstück / Schiene

- gerade Vignolschiene S49
- VOESTALPINE AG
- Stahl R260
- $l = 140 \text{ mm}$
- $T_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Bild 12-17: Einfluss der Schmierstrategie sowie der Prozessstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s und bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_W auf die mittlere größte Höhe des Profils Rz



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

- v_s variabel
- $Q'_w = 2,57 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- $Q'_w = 5,14 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- $Q'_w = 7,71 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- a_e variabel
- $v_f = 22,00 \text{ m/min}$
- $a_p = 20,00 \text{ mm}$

Gegenlauf

variable Schmierstrategien

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

- zylindrische Schleifscheibe
- STELLA KERAMIK
- 300 x 30 x 127 mm^3
- Korngröße 20 Mesh
- 100 % Schmelzkorund
- Kunstharzbindung
- Härte Q (hochhart)
- Struktur 4

Werkstück / Schiene

- gerade Vignolschiene S49
- VOESTALPINE AG
- Stahl R260
- $l = 140 \text{ mm}$
- $T_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Bild 12-18: Einfluss der Schmierstrategie sowie der Prozessstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s und bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_w auf den Materialanteil Rmr (5 %; - 0,4 μm)

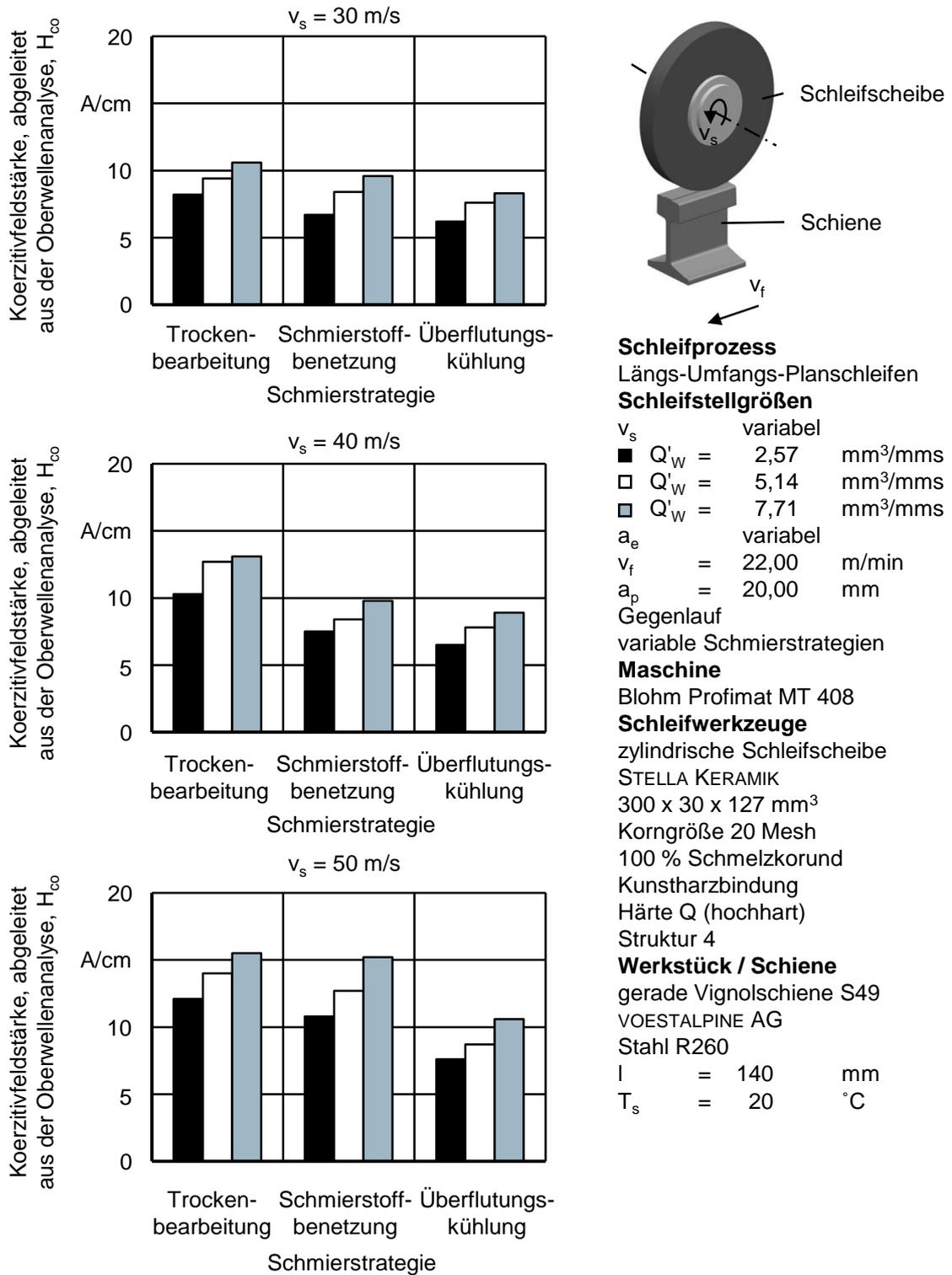
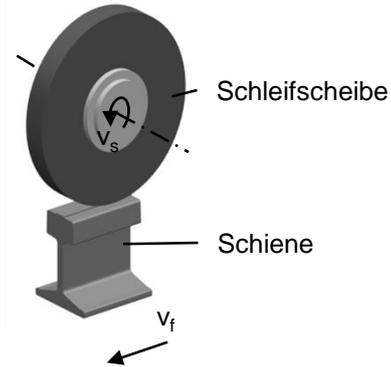
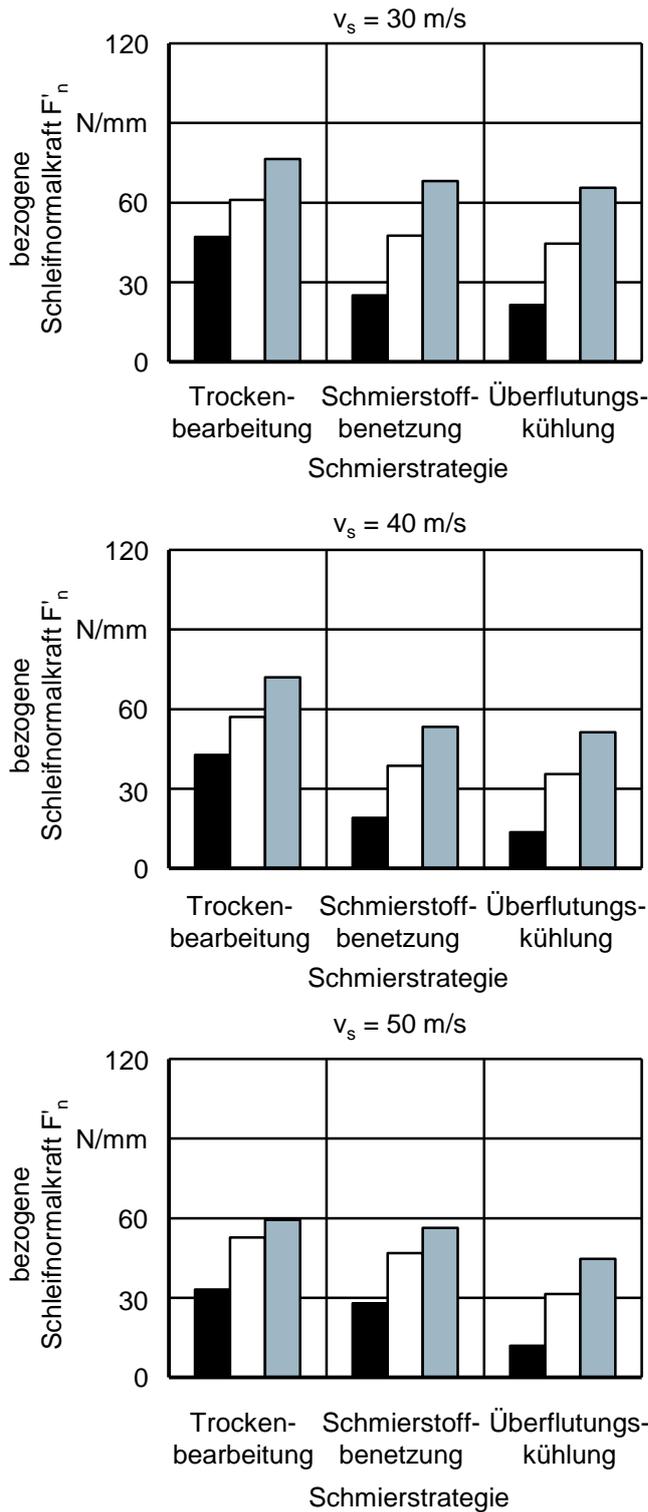


Bild 12-19: Einfluss der Schmierstrategie sowie der Prozessstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s und bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_W auf die Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse, H_{co}



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

- v_s variabel
- $Q'_w = 2,57 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- $Q'_w = 5,14 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- ▣ $Q'_w = 7,71 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- a_e variabel
- $v_f = 22,00 \text{ m/min}$
- $a_p = 20,00 \text{ mm}$

Gegenlauf

variable Schmierstrategien

Maschine

Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge

- zylindrische Schleifscheibe
- STELLA KERAMIK
- $300 \times 30 \times 127 \text{ mm}^3$
- Korngröße 20 Mesh
- 100 % Schmelzkorund
- Kunstharzbindung
- Härte Q (hochhart)
- Struktur 4

Werkstück / Schiene

- gerade Vignolschiene S49
- VOESTALPINE AG
- Stahl R260

- $l = 140 \text{ mm}$
- $T_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Bild 12-20: Einfluss der Schmierstrategie sowie der Prozessstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s und bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_w auf die bezogene Schleifnormalkraft F'_n

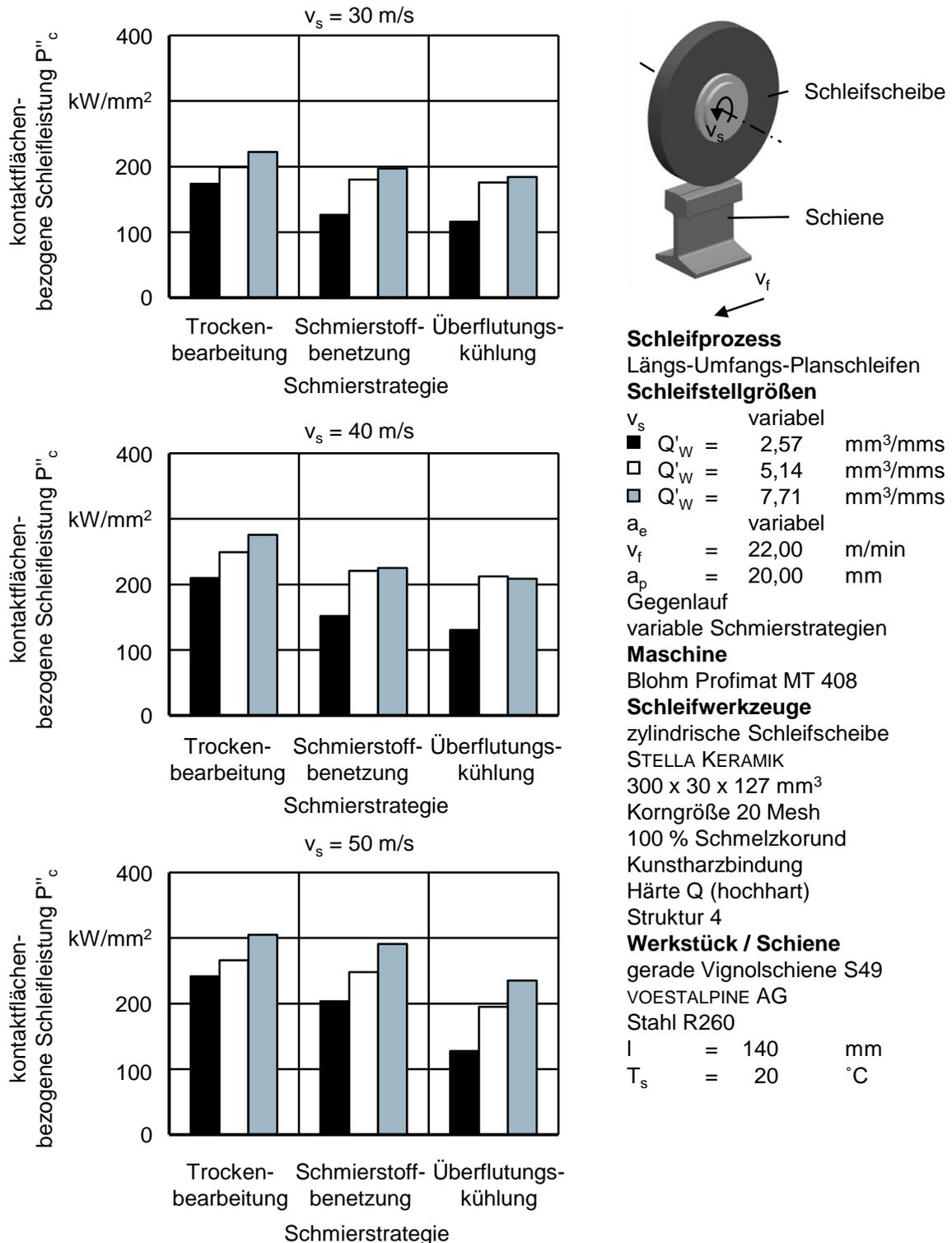
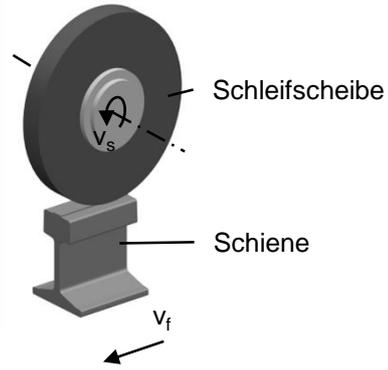
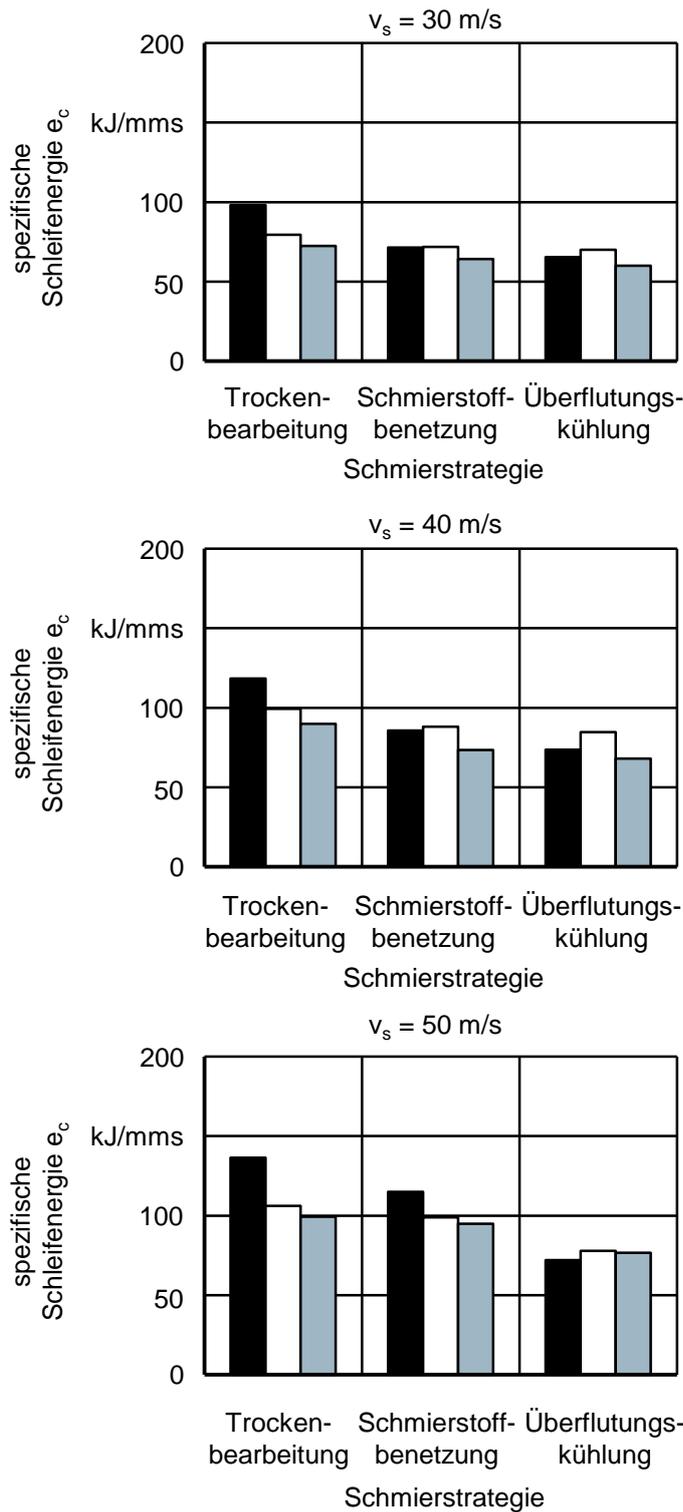


Bild 12-21: Einfluss der Schmierstrategie sowie der Prozessstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s und bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_W auf die kontaktflächenbezogene Schleifleistung P''_c



Schleifprozess

Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

- v_s = variabel
- $Q'_W = 2,57$ mm³/mms
- $Q'_W = 5,14$ mm³/mms
- $Q'_W = 7,71$ mm³/mms
- a_e = variabel
- $v_f = 22,00$ m/min
- $a_p = 20,00$ mm

Gegenlauf

variable Schmierstrategien

Maschine

Blohm Profimat MT 408

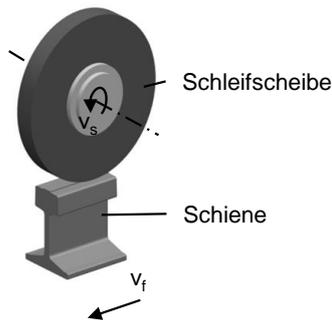
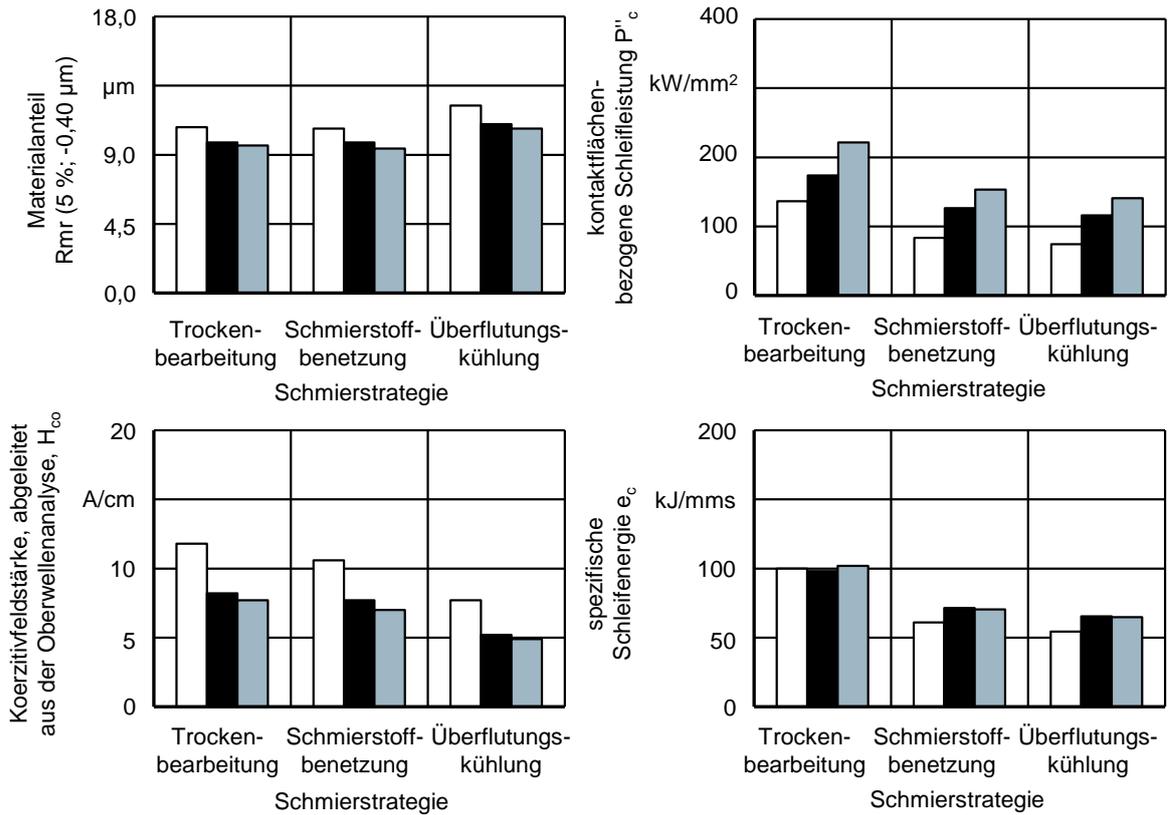
Schleifwerkzeuge

- zylindrische Schleifscheibe
- STELLA KERAMIK
- 300 x 30 x 127 mm³
- Korngröße 20 Mesh
- 100 % Schmelzkorund
- Kunstharzbindung
- Härte Q (hochhart)
- Struktur 4

Werkstück / Schiene

- gerade Vignolschiene S49
- VOESTALPINE AG
- Stahl R260
- $l = 140$ mm
- $T_s = 20$ °C

Bild 12-22: Einfluss der Schmierstrategie sowie der Prozessstellgrößen Umfangsgeschwindigkeit v_s und bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_W auf die spezifische Schleifenergie e_c



Schleifprozess
Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen

- $v_s = 30,000 \text{ m/s}$
- $\square Q'_w = 1,980 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- $\blacksquare Q'_w = 2,570 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- $\blacksquare Q'_w = 3,160 \text{ mm}^3/\text{mms}$
- $a_e = 0,007 \text{ mm}$
- v_f variabel
- $a_p = 20,000 \text{ mm}$
- Gegenlauf
- variable Schmierstrategien

Maschine

Blohm Profimat MT 408

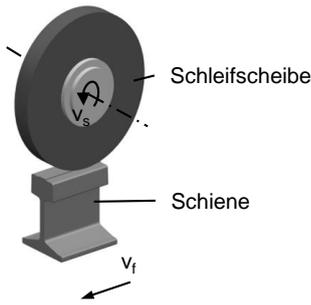
Schleifwerkzeuge

- zylindrische Schleifscheibe
- STELLA KERAMIK
- $300 \times 30 \times 127 \text{ mm}^3$
- Korngröße 20 Mesh
- 100 % Schmelzkorund
- Kunstharzbindung
- Härte Q (hart)
- Struktur 4

Werkstück / Schiene

- gerade Vignolschiene S49
- VOESTALPINE AG
- Stahl R260
- $l = 140 \text{ mm}$
- $T_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Bild 12-23: Einfluss der Schmierstrategie sowie der Vorschubgeschwindigkeit v_f auf den Materialanteil Rmr (5 %; - 0,4 μm) und, Koerzitivfeldstärke, abgeleitet aus der Oberwellenanalyse H_{co} , kontaktsflächenbezogene Schleifleistung P''_c sowie die spezifische Schleifenergie e_c .



Schleifprozess
 Längs-Umfangs-Planschleifen
Schleifstellgrößen
 $v_s = 30,000$ m/s
 Q'_W variabel
 a_e variabel
 $v_f = 22,000$ m/min
 $a_p = 20,000$ mm
 Gegenlauf
 Trockenbearbeitung
Maschine
 Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge
 zylindrische Schleifscheibe
 STELLA KERAMIK
 $300 \times 30 \times 127$ mm³
 Korngröße
 ■ 16 Mesh
 □ 20 Mesh
 ■ 24 Mesh
 100 % Schmelzkorund
 Kunstharzbindung
 Härte Q (hochhart)
 Kornbesatzdichte 4
Werkstück / Schiene
 gerade Vignolschiene S49
 VOESTALPINE AG
 Stahl R260
 $l = 140$ mm
 $T_s = 20$ °C

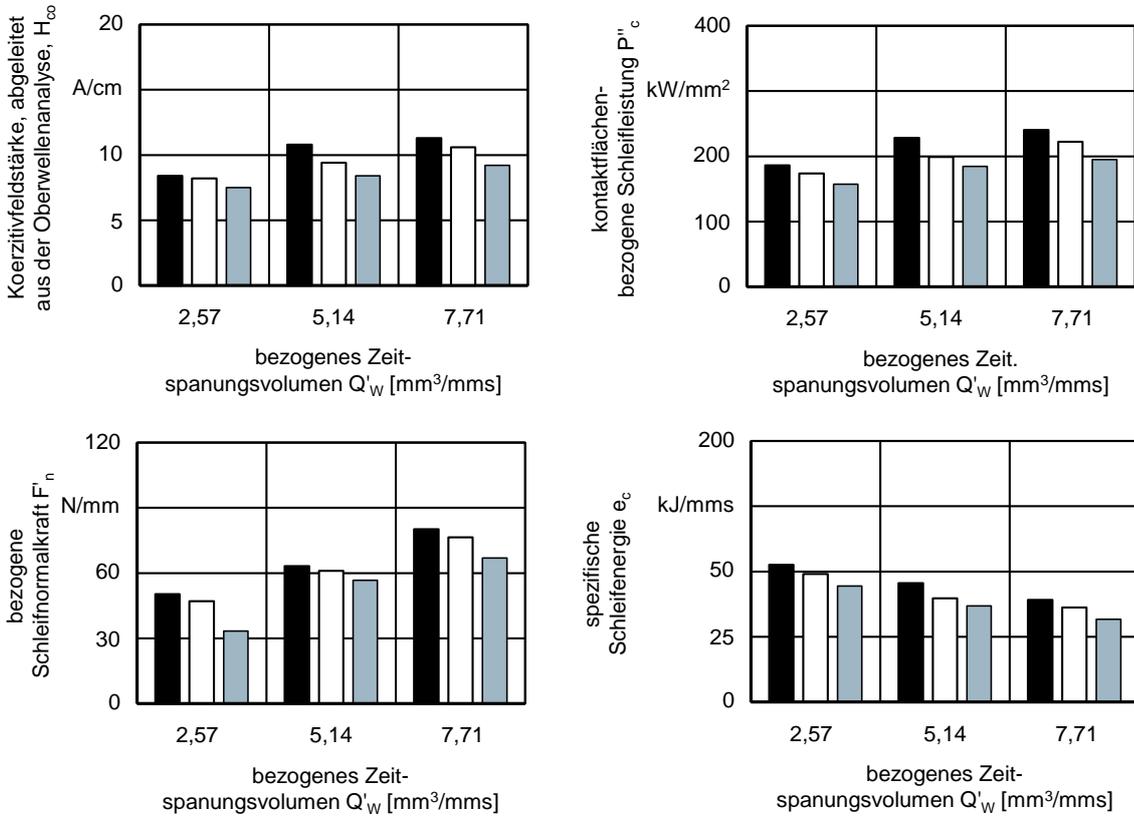


Bild 12-24: Einfluss der Korngröße der Schleifscheiben sowie der Prozessstellgröße bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_W auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte

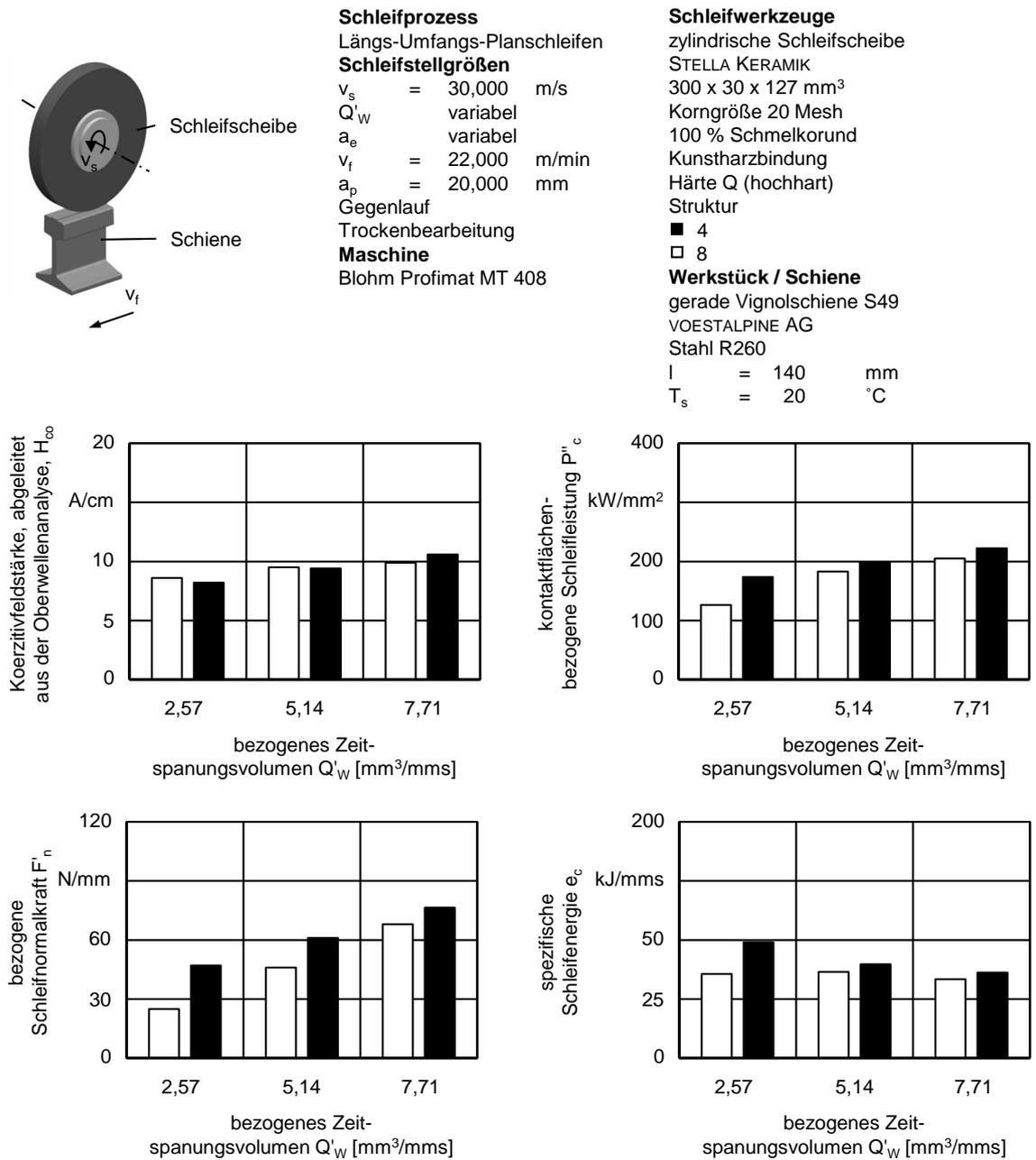
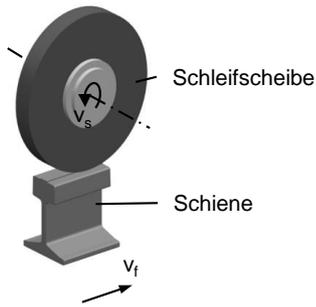


Bild 12-25: Einfluss der Struktur der Schleifscheiben sowie der Prozessstellgröße bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_w auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte



Schleifprozess
Längs-Umfangs-Planschleifen

Schleifstellgrößen
 $v_s = 30,000$ m/s
 Q'_W variabel
 a_e variabel
 $v_f = 22,000$ m/min
 $a_p = 20,000$ mm
 Gegenlauf
 Trockenbearbeitung

Maschine
Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge
 zylindrische Schleifscheibe
 STELLA KERAMIK
 $300 \times 30 \times 127$ mm³
 Korngröße 20 Mesh
 Anteil Sinterkorund
 ■ 0 %
 □ 15 %
 ▒ 30 %
 Kunstharzbindung
 Härte Q (hochhart)
 Struktur 4

Werkstück / Schiene
 gerade Vignolschiene S49
 VOESTALPINE AG
 Stahl R260
 $l = 140$ mm
 $T_s = 20$ °C

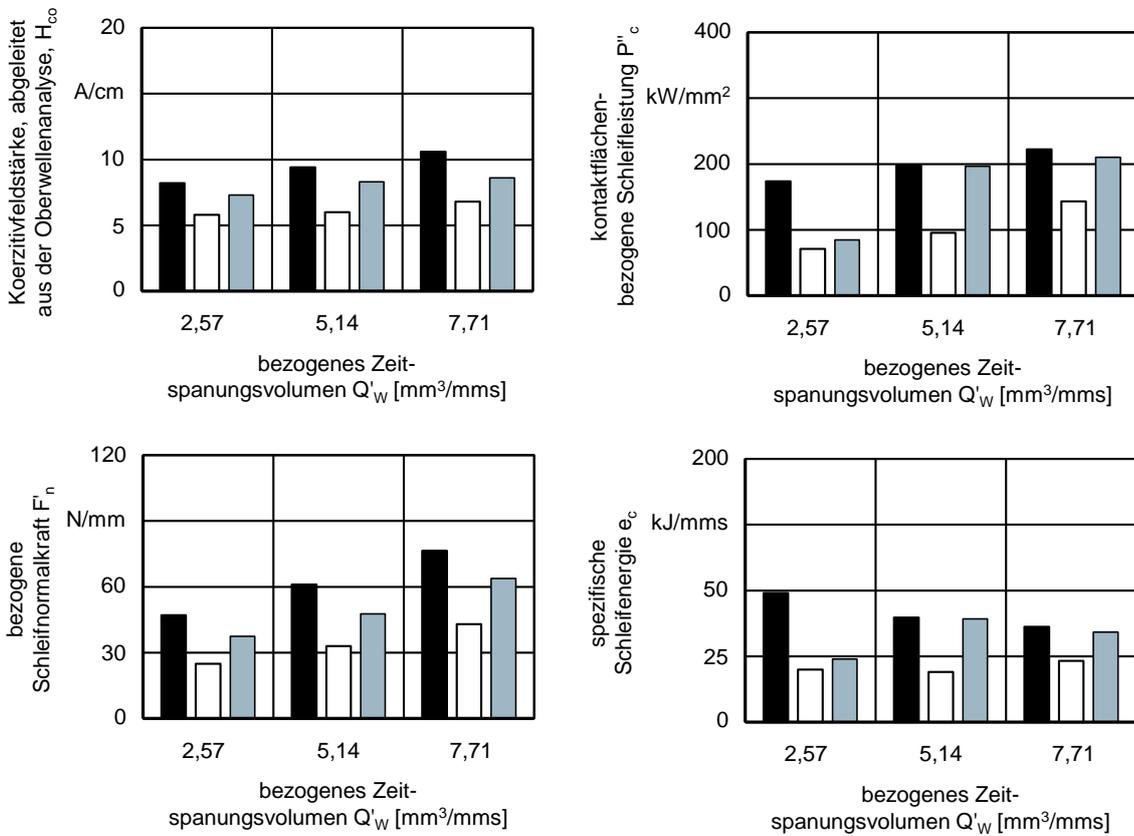


Bild 12-26: Einfluss des Sinterkorundanteils in den Schleifscheiben sowie der Prozessstellgröße bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_W auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte

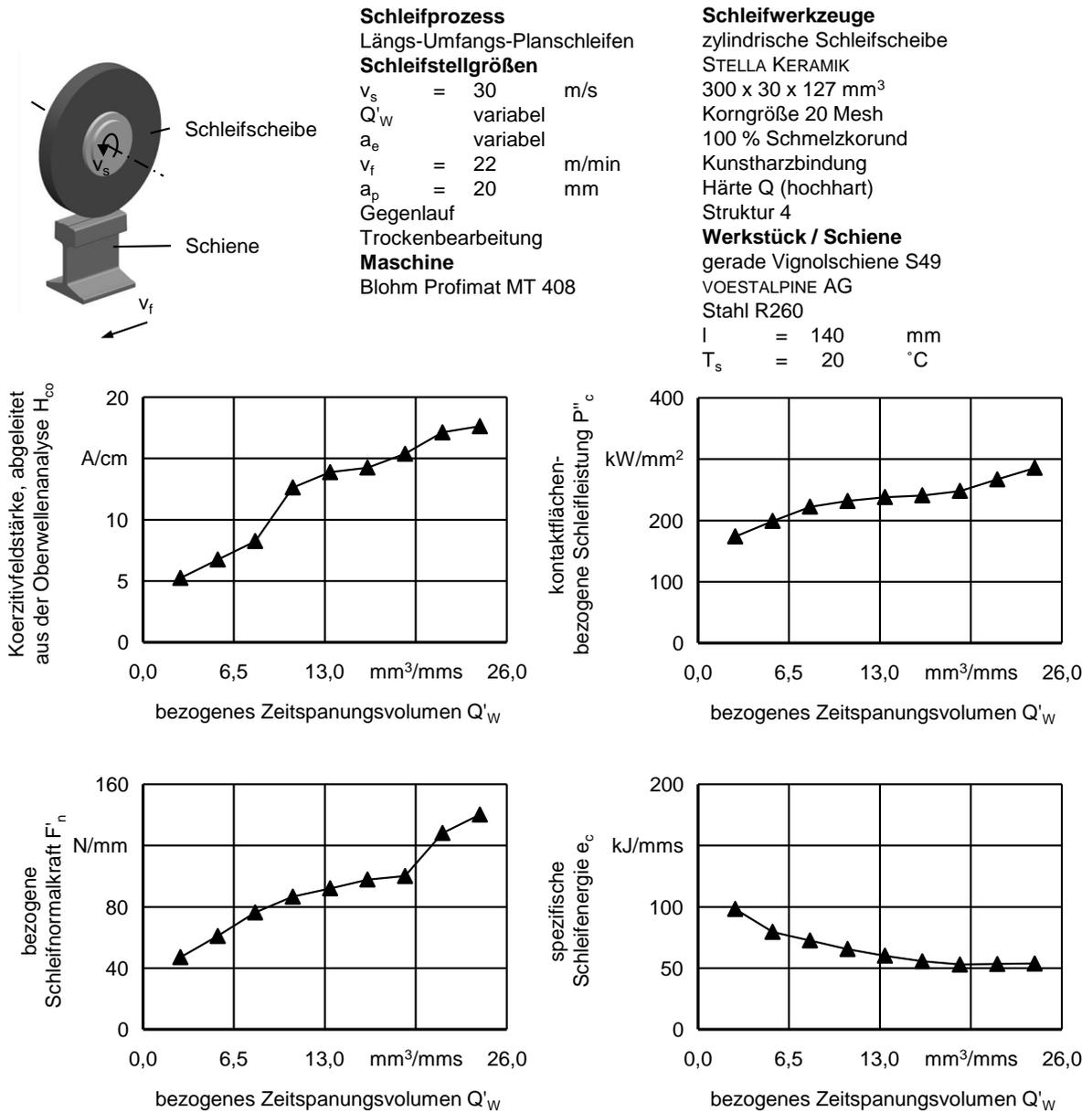
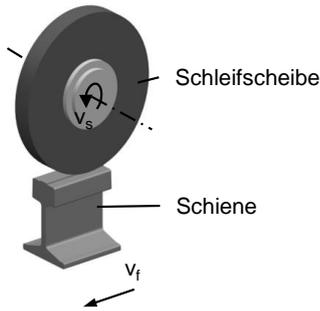


Bild 12-27: Einfluss der erhöhten bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_W unter Variation der Zustellung a_e auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte



Schleifprozess
 Längs-Umfangs-Planschleifen
Schleifstellgrößen
 $v_s = 30$ m/s
 Q'_W variabel
 $a_e = 0,007$ mm
 v_f variabel
 $a_p = 20$ mm
 Gegenlauf
 Trockenbearbeitung
Maschine
 Blohm Profimat MT 408

Schleifwerkzeuge
 zylindrische Schleifscheibe
 STELLA KERAMIK
 $300 \times 30 \times 127$ mm³
 Korngröße 20 Mesh
 100 % Schmelzkorund
 Kunstharzbindung
 Härte Q (hochhart)
 Struktur 4
Werkstück / Schiene
 gerade Vignolschiene S49
 VOESTALPINE AG
 Stahl R260
 $l = 140$ mm
 $T_s = 20$ °C

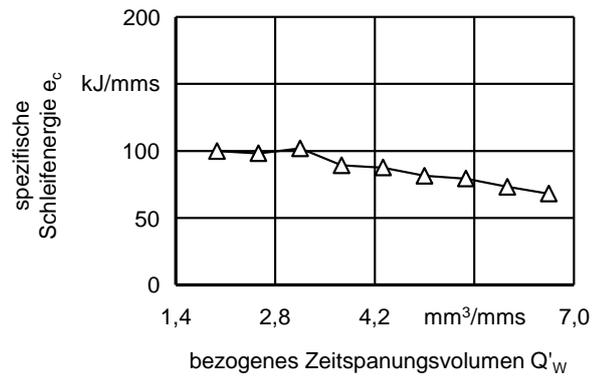
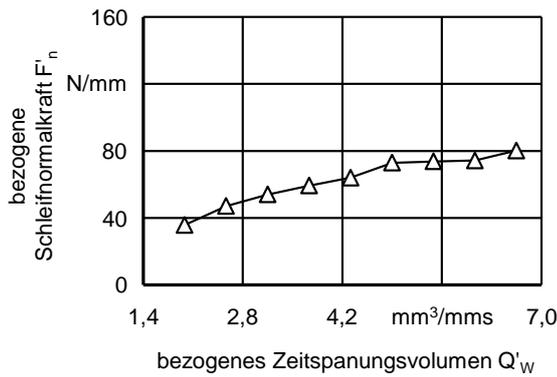
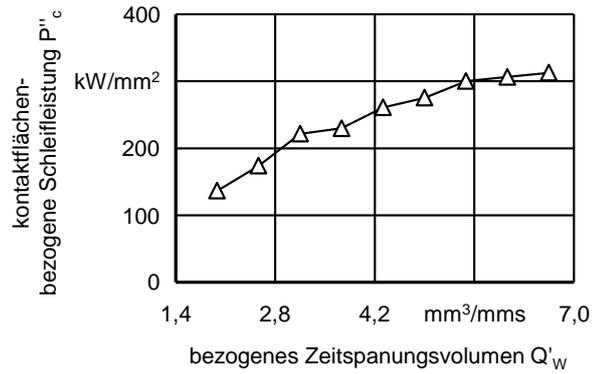
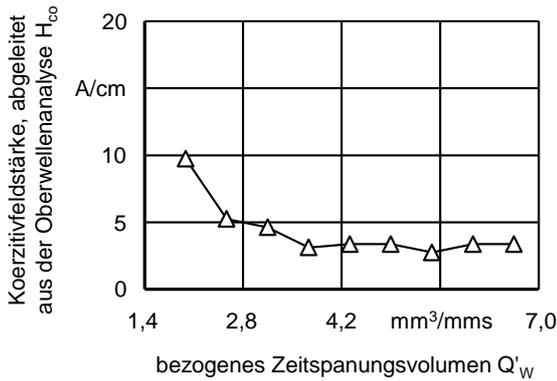


Bild 12-28: Einfluss der erhöhten bezogenen Zeitspannungsvolumina Q'_W unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit v_f auf die Bearbeitungsergebnisse und Prozesskennwerte

Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin

Wissensbasierte Diagnose technischer Systeme mit konnektionistischen Modellen
Hartwig Weber. 201 Seiten, 46 Abb., 7 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4496-6

Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten industrieller Qualitätstechniken im Dienstleistungsbereich
Alexander Gogoll. 173 Seiten, 71 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4498-2

Perforierschneiden mit Nd:YAG-Festkörper hoher Impulsenergien
Jürgen Betz. 167 Seiten, 97 Abb., 5 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4499-0

Analyse der Werkstückhaltekräfte am Dreibackenfutter im Rahmen einer Maschinen- und Prozeßüberwachung
Rolf Thiel. 130 Seiten, 69 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4495-8

Gestaltung von Entscheidungsstrukturen zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen
Florian Golm. 173 Seiten, 83 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4497-4

Fehlersensitive Produktgestaltung in integrierten Systemarchitekturen
Michael Stephan. 164 Seiten, 58 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4512-1

Wirtschaftliche Einführung der rechnerintegrierten Produktion in kleinen Unternehmen mit komplexer Produktionsstruktur
Wolfgang Bilger. 174 Seiten, 42 Abb., 1 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4511-3

Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen
Claudia Hentschel. 160 Seiten, 54 Abb., 16 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4513-X

Entwicklung eines Modells für eine rechnerunterstützte Qualitätswissensbasis
Jörg-Peter Brauer. 150 Seiten, 40 Abb., 2 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4520-2

Kühlschmierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe
Thomas Brücher. 330 Seiten, 124 Abb., 17 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4523-7

Einführen und Umsetzen von Total Quality Management
Christian Malorny. 310 Seiten, 68 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4524-5

Qualitätsmanagement für die Einführung bestandsarmer Produktionskonzepte
Torsten Walter. 143 Seiten, 37 Abb., 13 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4525-3

Virtuelle Tonmodellierung zur skizzierenden Formgestaltung im Industriedesign
Jörg Lüddemann. 166 Seiten, 76 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4519-9

Konzept zur Steigerung der Effektivität von Produktionsanlagen
Mehdi Al-Radhi, 165 Seiten, 45 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4528-8

Produktionsstrukturierung auf der Basis strategischer Eigenfertigungskomponenten
Olaf Sauer, 144 Seiten, 62 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4532-6

Auswahl und Konditionierung von Werkzeugen für das Außenrund-Profilschleifen technischer Keramiken
Ingo Liebe, 170 Seiten, 79 Abb., 16 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4509-1

Automatisiertes Nähen von Zuschnitten ungleicher Kontur

Thomas Gottschalk, 140 Seiten, 70 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4531-8

Featureintegrierte Fertigungsplanung

Armin Ulbrich, 209 Seiten, 93 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4529-6

Aufgabenbezogene Anordnung und Programmierung von Laserscannern für die 2D-Geometrieinspektion

Heinrich Schuler, 148 Seiten, 81 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4530-X

Arbeitsgestaltung zur Fehlervermeidung bei der SMD-Elektronikmontage

Stephan Krüger, 173 Seiten, 51 Abb., 22 Tab. 1996. Kartoniert.
ISBN 3-8167-4540-7

Modell der zyklischen Prozeßrestrukturierung als Teil des Total Quality Managements

Timo Füermann, 176 Seiten, 79 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4545-8

Analyse der Rentabilität von Qualitätstechniken

Philipp Theden, 158 Seiten, 50 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4544-X

Thermisch beschichtete CFK-Wellen im Maschinenbau

Andreas Kranz, 148 Seiten, 76 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4547-4

Integrativer Produktentwicklungsarbeitsplatz mit Multimedia- und Breitbandkommunikationstechnik

Thomas Kieseewetter, 169 Seiten, 60 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4548-2

Verbesserung der Planung von Produktionsprozessen im Werkzeugbau durch Qualitätsplanung mittels Quality Function Deployment (QFD)

Manfred Zoschke, 140 Seiten, 14 Abb., 7 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4546-6

Flexibel anpaßbare Softwaresysteme zur rechnerunterstützten Fertigungssteuerung

Harald Krause, 148 Seiten, 89 Abb., 27 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4551-2

Anpassung des Qualitätswesens bei Total Quality Management

Frank Krämer, 262 Seiten, 75 Abb., 40 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4558-X

Integration von Qualitäts- und Umweltmanagementsystemen und ihre betriebliche Umsetzung

Detlev Butterbrodt, 240 Seiten, 60 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4559-8

Die Entwicklung des deutschen Werkzeugmaschinenbaus in der Zeit von 1930 bis 1960

René Haak, 225 Seiten, 30 Abb., 9 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4556-3

Fertigungsintegrierte Instandhaltung

Ralf Jagodejkin, 195 Seiten, 55 Abb., 21 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4557-1

Analyse der Prozeßkette Pulverspritzgießen

Peter Merz, 165 Seiten, 78 Abbildungen. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4629-2

Bearbeitung von metallischen Gasturbinenwerkstoffen durch Tiefschleifen und Drahterodieren

Achim Meier, 220 Seiten, 80 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4627-6

Drehzahlsynchronisation der Wirkpartner beim Abrichten und Schleifen

Holger Eichhorn, 200 Seiten, 86 Abb., 13 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4630-6

Läppen von einkristallinem Silicium

Hendrik Engel, 200 Seiten, 85 Abbildungen, 13 Tabellen. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4631-4

Verschleißverhalten von polykristallinem Diamant bei instationärer Beanspruchung

Uwe Lachmund, 210 Seiten, 100 Abb., 15 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4632-2

Feature-basierte Meßplanung für Koordinatenmeßmaschinen

Michael Ciesla, 162 Seiten, 79 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4613-6

Informationssystem für heterogen verteilte Qualitätsinformationen

Volker Kleinhans, 150 Seiten, 67 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4612-8

Untersuchung und Interpretation der beim Schleifen der Nickelbasislegierung IN 738 LC induzierten Gefügeänderungen in der Randzone

Pengxi Li, 147 Seiten, 135 Abb., 19 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4634-9

Thermische Stabilisierung von Werkzeugmaschinen-Spindelkästen durch Carbonfaserverbundkunststoffe

Matthias Liebetau, 200 Seiten, 122 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4638-1

Kooperationsentwicklung mit Zulieferern in der Automobilindustrie Indonesien

Ida-Bagus Kesawa Narayana, 214 Seiten, 95 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4642-X

Flexible On-line-Prozeßoptimierung mit integrierten adaptiven Modellen

Martin Bauer, 160 Seiten, 55 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4622-5

Einsatz eines Mobilrobotersystems in der Endmontage des Schiffsstahlkörperbaus

Henning Müller, 170 Seiten, 62 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4552-0

Prozeßmodell für die Kraftübertragung durch neue Wirkflächen zur Entwicklung geometrietoleranter Demontagewerkzeuge

Martin Wagner, 170 Seiten, 100 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5130-X

Honen keramischer Werkstoffe

Uwe-Peter Weigmann, 250 Seiten, 103 Abb., 15 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4639-X

Modellierung und Vermessung linearer Gelenkbewegungen bei Industrierobotern

Michael Grethlein, 154 Seiten, 56 Abb., 5 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4644-6

Globalisierungspotentiale im Maschinenbau

Jens Nackmayr, 174 Seiten, 68 Abb., 5 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5132-6

Entwicklung und praktische Erprobung eines Kennzahlensystems für das Total Quality Management

Olaf Wolter, 190 Seiten, 52 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5136-9

Prozeßorientierte Techniken zur systematischen Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes

Ulrich Tammler, 185 Seiten, 72 Abb., 25 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5134-2

Eine Methode zur automatischen Strukturinterpretation in digitalisierten technischen Zeichnungen

Nailja Luth, 150 Seiten, 76 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4646-2

Ganzheitliches Modell zur Umsetzung von Total Quality Management

Philipp Radtke, 180 Seiten, 50 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5148-2

Ein methodischer Ansatz zum Strukturvergleich technischer Objekte

Matthias Müller, 245 Seiten, 54 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5160-1

Prozeßparameter beim Scherschneiden von Karosserieblechteilen

Andreas Pöllmann, 154 Seiten, 80 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5150-4

Biologisch basierte Verfahren zur Objekterkennung und Texturanalyse

Javier Ruiz-del-Solar, 145 Seiten, 98 Abb., 8 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4647-0

Methodisches Konstruieren als Mittel zur systematischen Gestaltung von Dienstleistungen

Wolfgang Schwarz, 130 Seiten, 80 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5140-7

Techniken zur Entwicklung von Führungsqualität im Total Quality Management

Claudia Kostka, 200 Seiten, 30 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5165-2

Metamodellierung als Instrument der Verknüpfung von Unternehmensmodellen

Wolfgang Müller, 170 Seiten, 61 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5164-4

Entwicklung und Realisierung einer Methode für die flexible Auswertung von Profillinien

Lorenz Voit, 145 Seiten, 75 Abb., 20 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5174-1

Gewichts- und Lärminderung von Laufrädern für Schienenfahrzeuge durch Einsatz von Faserverbundwerkstoffen

Frank Warmuth, 130 Seiten, 110 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5173-3

Prozeß-Benchmarking – Methode zum branchenunabhängigen Vergleich von Prozessen

Gunnar Siebert, 130 Seiten, 45 Abb., 21 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5182-2

Modellierungsvorgehen zur Planung von Geschäftsprozessen

Martin Schwermer, 160 Seiten, 54 Abb., 6 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5163-6

Bewertung und Verkürzung von Anlaufprozessen für Betriebsmittel

Ronald Fritsche, 135 Seiten, 71 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5169-5

Analyse des Drehens duktiler Werkstoffe mit der Finite-Elemente-Methode

Steffen Gerloff, 272 Seiten, 116 Abb., 7 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5161-X

Prozeßorientierte Auswahl von PPS-Systemen

Georg Neubauer, 146 Seiten, 85 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5184-9

Featurebasiertes Gestalten von Produkten mit Freiformgeometrien

Christiane Stiel, 153 Seiten, 50 Abb., 1 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5170-9

Entwicklung und Verifizierung eines Prozeßmodells für das Einzelpunktlöten in der Elektronikfertigung

Jörg Niemeier, 120 Seiten, 75 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5177-6

Beschleunigte Evolutionsstrategie zur Optimierung von Fertigungsprozessen

Jürgen H. Bremer, 125 Seiten, 38 Abb., 23 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5183-0

Konfigurierbares, multimediales Fernbetreuungssystem für rechnergesteuerte Fertigungseinrichtungen

Zaharya Menevidis, 155 Seiten, 51 Abb., 9 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5171-7

Funkenerosive Bearbeitung von polykristallinem Diamant

Steffen Appel, 150 Seiten, 62 Abb., 10 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5162-8

Analyse und Simulation des Laserstrahlschneidens von Faserverbundkunststoffen
Stefan Liebelt, 180 Seiten, 70 Abb., 12 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5190-3

Flexible Spannbacken für die Drehbearbeitung
Udo Bahrke, 168 Seiten, 120 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5193-8

Controlling des Fabrikbetriebes auf der Basis des Total Quality Managements (TQM)
Dirk Wilmes, 195 Seiten, 51 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5194-6

Ein Modell zur Reduzierung der Variantenvielfalt in Produktionsunternehmen
Sven-Norman Gembrys, 120 Seiten, 48 Abb.. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5199-7

Konzept eines Modells zur Produktentwicklung
Hanno Weber, 160 Seiten, 85 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5205-5

**Entwicklung einer handlungsorientierten Interaktionsmethode zur Benutzung
produktionstechnischer Datenbanken**
Regine Gernert, 168 Seiten, 40 Abb., 15 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5213-6

Modell zur Gestaltung und Auswahl von CAQ-Lösungen
Thomas Konert, 172 Seiten, 68 Abb., 5 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5207-1

Globales Produktdatenmanagement zur Verbesserung der Produktentwicklung
Matthias Doblies, 139 Seiten, 49 Abb., 21 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5224-1

Designintegrierte Produktplanung und Produktkonzeption
Timm Kehler, 158 Seiten, 78 Abb.. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5237-3

Verkürzung der Produktentwicklungszeit durch Parallelverarbeitung
Haygazun Hayka, 175 Seiten, 46 Abb., 13 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5228-4

**Analyse der Schnitt- und Kerbgeometrie sowie des Strahls beim
Abrasive Wasserstrahlschneiden**
Bernhard Axmann, 199 Seiten, 100 Abb., 20 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5236-5

Anwendung neuronaler Netze zur Werkzeugverschleißerkennung beim Fräsen
Edgar Fries, 200 Seiten, 106 Abb., 14 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5244-6

**Konzept zur lebenszyklusorientierten Verbesserung der Effektivität von
Produktionseinrichtungen**
Ulf Perlewitz, 162 Seiten, 75 Abb., 6 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5260-8

Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken
Jörg Krüger, 170 Seiten, 101 Abb., 21 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5268-3

Beitrag zur Entwicklung eines modularen TQM-Modells für das Krankenhauswesen
Bettina Hahne, 180 Seiten, 50 Abb., 5 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5290-X

Steuerungsintegriertes Prozeßüberwachungssystem für Drehmaschinen
Ireneus Suwalski, 167 Seiten, 106 Abb., 13 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5286-1

Montagesystemplanung und -steuerung für die variantenreiche Serienmontage
Kuo-Wen Chang, 148 Seiten, 59 Abb. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5294-2

Werkstückspannsysteme aus faserverstärkten Kunststoffen für die Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung

Uwe Mette, 227 Seiten, 106 Abb., 27 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5271-3

Bildanalysesystem zur robusten Erkennung von Kennzeichen an Fahrzeugen

Lutz Lohmann, 184 Seiten, 81 Abb., 18 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5534-8

Planung und marktorientierter Betrieb von Demontagefabriken

Holger Perlewitz, 180 Seiten, 72 Abb., 53 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5538-0

Simulation von Produktentwicklungsprozessen

Hans-Christoph Raupach, 150 Seiten, 60 Abb., 4 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5544-5

Induktive Wegsensoren zur Überwachung und Regelung des Blecheinzugs beim Tiefziehen

Ute Forstmann, 110 Seiten, 59 Abb., 2 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5547-X

Konstruktive Berechnungsmodelle auf Basis Neuronaler Netze

Alexander Carl, 135 Seiten, 53 Abb., 2 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5568-2

Konzeption eines webbasierten Beratungs-Unterstützungs-Systems am Fallbeispiel einer PDM-Systemauswahl

Toralf Kahlert, 140 Seiten, 50 Abb., 4 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5569-0

Ein Ansatz zum Konstruieren mit Lösungsräumen

Petrik Ziebel, 155 Seiten, 44 Abb., 6 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5577-1

Rapid Styling Validation - Berechnung und Simulation in der Konzeptphase der Produktentwicklung

Yasmina Bock, 150 Seiten, 57 Abb., 5 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5592-5

Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik

Thomas Ardel, 200 Seiten, 102 Abb., 19 Tab. 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5609-3

Beitrag zum Greifen von Textilien

Jörg Stephan, 140 Seiten, 100 Abb., 20 Tab. 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5622-0

Integrierte Unternehmensplanung auf der Basis von Unternehmensmodellen

Roland Jochem, 170 Seiten, 77 Abb. 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5623-9

Wege zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen

Katrin Müller, 177 Seiten, 45 Abb., 46 Tab. 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5884-3

Business-Exzellenz als qualitätsorientierter Entwicklungsansatz für Gründungsaktivitäten

Gunter Busch. 199 Seiten, 46 Abb., 4 Tab., 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-6045-7

Nutzung von Felddaten in der qualitätsgetriebenen Produktentwicklung und im Service

Andreas Edler. 131 Seiten, 64 Abb., 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5902-5

Package-Features für die Kommunikation in den frühen Phasen der Automobilentwicklung

Karsten Gessner. 154 Seiten, 39 Abb., 6 Tab., 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5636-0

System zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Werkzeugmaschinen

Michael Ising, 200 Seiten, 101 Abb., 5 Tab. 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5890-8

Verteilte Simulation des Materialversorgungsprozesses in Produktionsverbänden
Dirk Krützfeld, 141 Seiten, 78 Abb., 13 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6035-X

Integration eines visuellen Lageregelungssystems für sechs Freiheitsgrade in Industrieroboter
Yong-Uk Kwon, 161 Seiten, 63 Abb., 9 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6044-9

Magnetische Flüssigkeiten als Schmierstoff in hydrodynamischen Gleitlagern
Reiner Patzwald, 176 Seiten, 148 Abb., 27 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5892-4

Beitrag zum flexiblen Greifen in der Demontage
Alexander Stenzel, 129 Seiten, 66 Abb., 6 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5885-1

Strategische Unternehmensprozessgestaltung mit der Methode des Target Processing
Florian Weymar. 170 Seiten, 59 Abb. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5898-3

Beitrag zur Innovationsentwicklung in indonesischen Unternehmen durch kompetenzorientierte Netzwerkbildung
Agung Budi Utomo Halim. 206 Seiten, 73 Abb., 53 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6065-1

Fehlerbeseitigungsmanagement unter Berücksichtigung der Plattformstrategie am Beispiel der Automobilindustrie
Daniel Schukraft. 137 Seiten, 87 Abb. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6079-1

Auslegung magnetumgeformter Verbindungen durch Simulation
Stefan Mehnert. 141 Seiten, 118 Abb., 17 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6086-4

Statistische Prozessregelung bei administrativen Prozessen im Rahmen eines ganzheitlichen Prozesscontrollings
Thomas Gerboth. 123 Seiten, 46 Abb., 12 Tab., 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6080-5

Sichere synchrone Telekooperation zur Optimierung der verteilten Produktentstehung
Ralf Schultz. 150 Seiten, 61 Abb., 4 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6088-0

Verbesserte Anpassungsfähigkeit des Änderungsmanagements durch komplementäre Selbstorganisation
Ralf Brunken. 134 Seiten, 52 Abb., 2 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6144-5

Durchlaufzeitreduzierung durch Harmonisierung von Belegungszeiten und Einführung flexibler Prozeßteams
Reiner Friedland. 170 Seiten, 47 Abb., 13 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6139-9

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen durch eine Life Cycle Unit
Waldemar Grudzien. 170 Seiten, 75 Abb., 33 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6174-7

Beitrag zum Variantenmanagement und zur Prozessoptimierung im Wagenkastenbau von Schienenfahrzeugen
Holger Schmidt. 170 Seiten, 84 Abb., 10 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6178-X

Modellierung von Layout und Steuerungsregeln für die Materialfluss-Simulation
Markus Rabe. 222 Seiten, 135 Abb. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6262-X

CVD-Diamant als Schneidstoff
Marcus Brücher. 187 Seiten, 87 Abb., 18 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6280-8

Berechnungsmodell zur Ermittlung von Spannkraften bei Backenfuttern
Pingfa Feng. 213 Seiten, 203 Abb., 17 Tab. 2003. Kartonierte. ISBN 3-8167-6371-5

Beitrag zur Entwicklung modularer Demontagewerkzeuge
Uwe Rebařka. 138 Seiten, 78 Abb., 28 Tab. 2003. Kartonierte. ISBN 3-8167-6381-2

Beitrag zur voxelbasierten Simulation des fünffachsignen NC-Fräsens
Zengxuan Hou. 160 Seiten, 80 Abb., 3 Tab. 2003. Kartonierte. ISBN 3-8167-6401-0

Aufbau hierarchiearmer Produktionsnetzwerke – Technologiestrategische Option und organisatorische Gestaltungsaufgabe
Carsten S. Schröder, 210 Seiten, 59 Abb., 1 Tab. 2003. Kartonierte. ISBN 3-8167-6398-7

Sprache zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen
Roland Heimann, 158 Seiten, 55 Abb., 6 Tab. 2004. Kartonierte. ISBN 3-8167-6456-8

Beitrag zur dynamischen Prozessplanung und Generierung von Steuerungssequenzen für flexible Demontagesysteme
Hyung-Ju Kim. 164 Seiten, 75 Abb., 19 Tab. 2004. Kartonierte. ISBN 3-8167-6559-9

Öko-Effizienz durch Nutzenverkauf am Beispiel der Automobilindustrie
Gitta Vischer. 193 Seiten, 62 Abb., 42 Tab. 2004. Kartonierte. ISBN 3-8167-6561-0

Applications of Subdivision Techniques in Product Development
Nele Gross. 136 Seiten, 51 Abb. 2003. Kartonierte. ISBN 3-8167-6576-9

Werkzeuge zum impuls-magnetischen Warmfügen von Profilen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen
Robert Hahn. 209 Seiten, 95 Abb., 18 Tab. 2004. Kartonierte. ISBN 3-8167-6642-0

Ultraschallunterstütztes Quer-Seiten-Schleifen
Nikolai-Alexander Daus. 145 Seiten, 78 Abb., 5 Tab. 2004. Kartonierte. ISBN 3-8167-6657-9

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen durch Anpassen von Mobiltelefonen
Bahadır Basdere. 208 Seiten, 77 Abb., 26 Tab. 2004. Kartonierte. ISBN 3-8167-6662-5

Informationstechnische Integration hybrider Demontagesysteme
Thomas Keil. 183 Seiten, 79 Abb., 15 Tab. 2004. Kartonierte. ISBN 3-8167-6688-9

Soft Data Fusion for Computer Vision
Aureli Soria-Frisch. 242 Seiten, 118 Abb., 7 Tab. 2004. Kartonierte. ISBN 3-8167-6689-7

Trennende Schutzeinrichtungen für Werkzeugmaschinen zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung
Jörg Bold. 220 Seiten, 99 Abb., 39 Tab. 2005. Kartonierte. ISBN 3-8167-6697-8

Auslegung dünner Hartstoffschichten für Zerspanwerkzeuge
Karsten Klein. 172 Seiten, 88 Abb., 17 Tab. 2005. Kartonierte. ISBN 3-8167-6700-1

Methode zur Komplexitätsreduzierung der Auftragssteuerung in der Elektronikmontage
Dietrich Fischer. 202 Seiten, 97 Abb., 6 Tab. 2005. Kartonierte. ISBN 3-8167-6729-X

Sicherheitszentrierte Architektur für Internet-basierte Dienste im Maschinen- und Anlagenbau
Ralf Berger. 120 Seiten, 70 Abb., 16 Tab. 2005. Kartonierte. ISBN 3-8167-6777-X

Methodische Entwicklung von modularen IT-Dienstleistungen

Klaus Herbst. 219 Seiten, 63 Abb. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6778-8

Flexible Integration von Rapid Prototyping Prozessketten in die Produktentwicklung

Stefan Dreher. 139 Seiten, 54 Abb., 10 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6843-1

Risikominimierung bei der Beschaffung investiver Dienstleistungen durch den Einsatz von Methoden des Qualitätsmanagements

Marc Bockschecker. 195 Seiten, 36 Abb., 6 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6900-4

Verfahren zum Einzelpunktlöten von elektrischen Anschlusskontakten mit getrennter Erwärmung von Lötstelle und Lot

Andreas Frenzke. 140 Seiten, 69 Abb., 17 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6919-5

Adaptive Modellierung und Simulation von Produktentwicklungsprozessen

Johannes Voigtsberger. 174 Seiten, 58 Abb. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6929-2

Konditionieren von Diamantschleifscheiben

Frank Sroka. 229 Seiten, 111 Abb., 7 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6937-3

Zustandsorientierte Instandhaltung von Standardkomponenten mit Life Cycle Units

Alexander Buchholz. 200 Seiten, 99 Abb., 9 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6938-1

Beitrag zur Gestaltung horizontaler Innovationskooperationen in Klein- und Mittelbetrieben am Beispiel Schienengüterverkehr

Ulrich Kroß. 166 Seiten, 56 Abb., 11 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6962-4

Verfahren und Systeme zur Demontage komplexer technischer Gebrauchsgüter

Jens-Peter Härtwig. 242 Seiten, 108 Abb., 19 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6963-2

Neue Einsatzmöglichkeiten von Ferrofluiden in technischen Systemen mit relativ zueinander bewegten Komponenten

Nayim Bayat. 175 Seiten, 113 Abb., 19 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7014-2

Wissensbilanzen für mittelständische Organisationen

Kay Alwert. 181 Seiten, 65 Abb., 25 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7033-9

Entwicklung eines lernfähigen Bildverarbeitungssystems unter Einsatz von Verfahren des Soft Computing

Mario Köppen. 158 Seiten, 56 Abb., 7 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7056-8

Hochleistungsfräsen von Superlegierungen

Eric Wiemann. 239 Seiten, 124 Abb., 34 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7082-7

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität durch Anpassungsprogrammplanung

Carsten Franke. 220 Seiten, 82 Abb., 34 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7095-9

Beitrag zur simulationsgestützten Planung von Demontagefabriken für Elektro- und Elektronikaltgeräte

Markus Ciupek. 179 Seiten, 77 Abb., 26 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7112-2

Management von Ingenieurkompetenzen im Spannungsfeld beruflicher Arbeitsteilung

Matthias Patrick Meyer. 180 Seiten, 31 Abb., 7 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7127-0

Approach of Integrated Order Scheduling and Flexible Resource Planning for Mass Customization

Ingo Lümke. 193 Seiten, 38 Abb., 10 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7223-4

Entwicklung von Hartmetallwerkzeugen für die Mikrozerspanung mit definierter Schneide

Kai Schauer. 178 Seiten, 107 Abb., 15 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7245-5

Informationssystemische Prozessorganisation mit sozioorientierter Transformation

Dieter Schacher. 163 Seiten, 65 Abb. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7285-9

Eigenschaften und Einsatzverhalten CVD-diamantbeschichteter Hartmetallwerkzeuge

Rouven Kott. 166 Seiten, 84 Abb., 7 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7323-8

Grundlagen und Prozessstrategien der Mikrofunktenerosion für die Bearbeitung von Rotationsbauteilen

Sascha Piltz. 266 Seiten, 139 Abb., 27 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7345-0

Verfahrensgrundlagen und Technologie des Hubschleifens mit viskosen Schleifmedien

Hubert Szulczynski. 175 Seiten, 87 Abb., 13 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7379-5

Modellierung und Analyse verteilter Entwicklungsprozesse für mechatronische Systeme

Chris Biantoro. 174 Seiten, 102 Abb. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7406-8

Beitrag zum Vereinzeln flächiger biegeschlaffer Bauteile

Frank Szimmat. 177 Seiten, 106 Abb., 19 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7424-2

Kompetenzabhängiges Simulationsverfahren zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen

Matthias Strebler. 132 Seiten, 33 Abb., 1 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7432-7

Integriertes Benchmarking für kleine und mittlere Unternehmen

Holger Kohl. 166 Seiten, 41 Abb., 19 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7439-6

Informationsmanagement zur Planung und Verfolgung von Produktlebenszyklen

Holger Jungk. 147 Seiten, 72 Abb., 5 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7461-7

Beitrag zum wirtschaftlichen Betrieb von Recyclingnetzwerken

Monica Vanegas. 174 Seiten, 65 Abb., 41 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7558-4

Eine Ontologie-basierte Methode zur Entscheidungsunterstützung in der Produktentwicklung

Hauke Arndt. 193 Seiten, 59 Abb. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7641-3

Analyse der Effekte beim Trockeneisstrahlen

Mark Claudius Krieg. 144 Seiten, 60 Abb., 27 Tab. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7625-3

Optimierte Zulieferintegration in der Produktentwicklung durch Ad-hoc-Kooperationswerkzeuge

Hendrik Gärtner. 166 Seiten, 61 Abb. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7655-0

Zerspanungslösungen für die Werkzeugkonstruktion und Prozessauslegung beim Fräsen

Alexander Marc Mattes. 169 Seiten, 79 Abb., 20 Tab. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7847-9

Aerodynamische Trenn- und Förderprozesse zur Steigerung der Demontageflexibilität bei Automobilkomponenten

Stefano Consiglio. 154 Seiten, 71 Abb., 13 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7955-1

Planung der Wiederverwendung von Elektro(nik)altgeräten

Sebastian Kernbaum. 236 Seiten, 87 Abb., 19 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7966-7

Verfahren zur ad hoc-Modellierung und -Simulation räumlicher Feder-Masse-Systeme für den Einsatz in Virtual Reality-basierten Handhabungssimulationen

Jens Neumann. 226 Seiten, 106 Abb., 27 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7955-1

Beeinflussung des Vorbehandlungszustandes der Substratrandzone durch Trockeneisstrahlen am Beispiel von Klebverbindungen

Adil El Mernissi. 157 Seiten, 72 Abb., 21 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7980-3

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität durch Modularisierung von Produkten

Marco Zettl. 236 Seiten, 65 Abb., 18 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7986-5

Herstellung und Einsatz CVD-diamantbeschichteter Bohrgewindefräser

Jens König. 188 Seiten, 65 Abb., 18 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0025-2

Akzeptanzförderung bei der Einführung von Wissensmanagement - Ein Methodenbaukasten für kleine und mittlere Unternehmen

Ina Kohl. 178 Seiten, 30 Abb., 13 Tab., 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0050-4

Technisch-wirtschaftliche Bewertung von Flexibilität in Rohbauebenenlinien

Arne Lambertz. 240 Seiten, 164 Abb., 10 Tab, 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0117-4

Charakterisierung und Auslegung der Grenzschicht PVD-beschichteter Schneidkeramiken.

Tom Hühns. 179 Seiten, 72 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0132-7

Virtuelle Rekonstruktion von Innenräumen basierend auf Messdaten von Tiefenkameras

Alexander Sabov. 174 Seiten, 86 Abb., 10 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0144-0

Ermittlung, Berechnung und Optimierung des strukturmechanischen Verhaltens am Beispiel von Fräsmaschinen

Carsten Mense. 169 Seiten, 58 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0156-3

Beitrag zur nachhaltigen industriellen Wertschöpfung durch multiattributive Bewertung von Montageanlagen

Timo Fleschutz. 193 Seiten, 62 Abb., 8 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0171-6

Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme

Nils Weinert. 174 Seiten, 52 Abb., 16 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0173-0

Semantic-Web-Wissensbank für Planungsprozesse bei der Wiederverwendung von Produktionsanlagen

Robert Harms. 210 Seiten, 93 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0180-8

Einsatzverhalten genuteter CBN-Schleifscheiben mit keramischer Bindung beim Außenrund-Einsteichschleifen

Mathias Kirchgatter. 173 Seiten, 85 Abb., 19 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0211-9

Planung ingenieurwissenschaftlicher Qualifizierung mit Semantik-Web-Wissensbanken

Carsten Reise. 178 Seiten, 61 Abb., 26 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0217-1

Development of an Intellectual Capital-Based Management System for Science Parks
Hamad Al Hashemi. 154 Seiten, 54 Abb., 7 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0218-8

Adaptive physikbasierte Modelle für die interaktive Deformationssimulation in der Virtuellen Realität

Ulrike Völlinger. 222 Seiten, 109 Abb., 25 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0273-7

Beitrag zu verteilten technischen Innovationsprozessen unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien

Semih Severengiz. 208 Seiten, 35 Abb., 15 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0232-4

Hybride Interaktionstechniken des immersiven Skizzierens in frühen Phasen der Produktentwicklung

Johann Habakuk Israel. 389 Seiten, 120 Abb., 26 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0330-7

Depth Data based Determination of Gait Parameters of Subjects after Stroke for the Use in Clinical Gait Rehabilitation

Jochen Radmer. 152 Seiten, 84 Abb., 14 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0332-1

Integration von Modellkonzeption und Management der Unternehmensmodellierung

Thomas Knothe. 190 Seiten, 48 Abb., 32 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0355-0

Wissensgenerierung in hybriden Leistungsbündeln durch die Virtual Life Cycle Unit

René Gegusch. 184 Seiten, 81 Abb. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0371-0

Strategische Unternehmensentwicklung auf Basis immaterieller Werte in KMU

Markus Will, 219 Seiten, 56 Abb., 31 Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0376-5

Modellbasierte Prozessauslegung des Druckfließlappens am Beispiel keramischer Werkstoffe

Vanja Mihotovic, 166 Seiten, 65 Abb., 5 Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0390-1

Schleifen von Hartmetall- und Vollkeramik-Schaftfräsern

Christoph Hübert, 154 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0393-2

A haptic control framework for end-effector based gait simulation interfaces and its application in patient-adaptive rehabilitation training

Sami Hussein, 160 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0464-9

Auditierung von Wissensbilanzen. Eine Methode zur Qualitätssicherung von Bilanzen des Intellektuellen Kapitals

Wen-Huan Wang, 200 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0490-8

Einsatzverhalten von PKD und Bor-dotiertem CVD-Diamant bei der Mikrofunkenerosion

Markus Röhner, 224 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0497-7

Effective Motion Design Applied to Energy-Efficient Handling Processes

Tobias Brett, 205 Seiten, 84 Abb. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0511-0

Fortschrittsbewertung von Fabrikplanungsprojekten

Sven Glinitzki, 230 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0520-2

Kompensation der Verlagerung an nachgiebigen Werkzeugmaschinengestellen am Beispiel von Fräsmaschinen für die Mikrobearbeitung

Jörg EBmann, 164 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0565-3

Approach for Integrating Predictive-Reactive Job Shop Scheduling with PLC-Controlled Material Flow

Azrul Azwan Abdul Rahman, 168 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0622-3

Product-Service Systems Enabling for Sustainable City Mobility

Jialiang Hu, 167 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0632-2

Integration optischer Messtechnik in Ultrapräzisionsmaschinen für die Korrekturbearbeitung beim Drehen mit Slow-Slide-Servo

Martin Kurz, 213 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0630-8

Contribution to efficient water use and reducing environmental impact of wastewater in industry

Chenqing Wang, 213 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0637-7

Patientengerechte Gestaltung computerbasierter Anwendungen in der gerätegestützten, motorischen Therapie nach Schlaganfall

Simone Schmid, 182 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0634-6

Einfluss der Oberflächenstrukturierung und -texturierung eines Kunststoffsubstrats auf die Anhaftung von Zellen

Quang Ut Huynh, 193 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0631-5

Modellierung und Simulation des thermischen Verhaltens einer Werkzeugmaschine mit der Finite-Elemente-Methode

Jiangmin Hu, 191 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0660-5

Möglichkeiten und Grenzen des Strahlspanens mittels CO₂ Hochdruckstrahlen

Martin Bilz, 170 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0661-2

Nachhaltige Technologiepfade für unterschiedliche Entwicklungsniveaus

Pia Gausemeier, 247 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0670-4

Enabling sustainable value creation by engineering capacity building

Sadiq Ahmad Muhammad Abd Elall, 161 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0687-2

Verwendung von Traceability-Modellen zur Unterstützung der Entwicklung technischer Systeme.

Grischa Beier, 378 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0681-0

Effiziente Erfassung und Pflege von Traceability-Modellen zur Entwicklung technischer Systeme

Asmus Figge, 311 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0705-3

Steigerung der Wirtschaftlichkeit beim Mikrofräsen durch Schneidkantenpräparation mittels Tauchgleitlappen.

Armin Löwenstein, 222 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0652-0

Integrated Engineering of Products and Services

Patrick Müller, 366 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0549-3

Konzeption und Realisierung einer Methode zur templategestützten Systementwicklung

Simon Frederick Königs, 258 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0652-0

Community-Based Design of Process Chains for Manufacturing and Recycling
Steffen Heyer, 189 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0731-2

**Werker-Assistenz und -Qualifizierung für manuelle (De-)Montage durch bild- und schrift-
gestützte Visualisierung am Arbeitsplatz**
Aleksandra Barbara Postawa, 206 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert.
ISBN 978-3-8396-0733-6

Vereinfachung der Systemmontage von metalloptischen IR-Spiegelteleskopen
Sebastian Scheiding, 163 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0774-9

Geschäftsmodelle der Wiederaufbereitung für Hersteller von Originalteilen
Henry Widera, 218 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0820-3

**Verfahren zur mechanischen Erzeugung periodischer nanooptischer Strukturen mit
monokristallinen Diamantwerkzeugen am Beispiel von Blazegittern**
Kurt Haskic, 196 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0859-3

Absicherung des Innovationserfolgs unter Berücksichtigung des Open-Innovation-Ansatzes
Manuel Rothe, 184 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0861-6

Steigerung der Nutzungspotenziale von CVD-diamantbeschichteten Werkzeugen
Fiona Sammler, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0906-4

Prozessstrategien beim NC-Formschleifen mit Schleifstiften
Tiago Borsoi Klein, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0943-9

Netzfreie Zerspanungssimulation mit der Finite-Pointset-Methode
Robert Gerstenberger, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0946-0

**Untersuchung des Einflusses von Dreh-, Drehfräs-, Glattwalz- sowie Schleifprozessen auf das
tribologische Einsatzverhalten von Stahl am Beispiel des Rad-Schiene-Kontakts**
Stefan Gebhard, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0955-2

**Keramische Schafffräswerkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Nickelbasis-
Legierungen**
Manuel Wacinski, 148 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0965-1

**Additive Fertigung von Nickelbasis-Superlegierungen mittels Laserstrahlschmelzens am
Beispiel von Diamalloy 4004NS**
Kamilla König-Urban, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0978-1

Modellbasierte Prozessoptimierung für das Mikrofräsen
Frederik Felix Mahr, 234 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0986-6

Quantitative Betriebsmittelbedarfsplanung für die getaktete Fließfertigung
Jakob Dinse, 158 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0951-4

**Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Einführung eines globalen
Qualitätsmanagementsystems**
Felix Meentken, 208 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0998-9

**Entscheidungsmethodik zur kompetenzbasierten Team-Organisation bei der
Implementierung von Energiemanagementsystemen**
Phillip Karcher, 240 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0991-0

Nutzenoptimierter Einsatz präventiver Qualitätsmethoden im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie

Markus Heintzmann, 238 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-0993-4

Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Einführung eines globalen Qualitätsmanagementsystems

Felix Meentken, 208 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartonierte. ISBN 978-3-8396-0998-9

Qualitätsreferenzmodell für die Produktion von Unikaten und Kleinserien

Dominik Rößle, 281 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1035-0

Einfluss von Herstellungs- und Lagerungsfaktoren auf die Eigenschaften von Trockeneispellets und das Strahlsergebnis.

Simon Motschmann, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1014-5

Niedrigdimensionale Modelle zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung der Pose.

Jens Hermann Wintering, 207 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte.

ISBN 978-3-8396-0999-6

Einfluss von Herstellungs- und Lagerungsfaktoren auf die Eigenschaften von Trockeneispellets und das Strahlsergebnis.

Simon Motschmann, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1014-5

Trockenfunkenerosives Feinbohren von Hochleistungswerkstoffen

Tassilo-Maria Schimmelpfennig, 149 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte.

ISBN 978-3-8396-1060-2

Nachhaltige Unternehmensentwicklung aus ressourcenorientierter Perspektive

Ronald Orth, 388 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1062-6

Verfahren zur schnellen, digitalen Modellbildung für Inspektions- und Reengineeringprozesse

Hendrik Grosser, 385 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1077-0

Prozessauslegung zum Schnellhubschleifen von Hochleistungskeramik

Christoph Sammler, 205 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1064-0

CO₂-Schneeentstehung und deren Wirkung auf die Effekte beim CO₂-Schneestrahlen

Michael Kretzschmar, 171 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1065-7

Einsatzverhalten nanocomposite-beschichteter PcBN-Werkzeuge für die Hartdrehbearbeitung

Javier Alejandro Oyanedel Fuentes, 162 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte.

ISBN 978-3-8396-1081-7

Kubisch-kristallines Bornitrid ohne Bindephase als Schneidstoff in der Ultrapräzisions-Zerspanung

Julian Polte, 187 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1137-1

Herstellung und Einsatz von PKD-Mikrofräswerkzeugen

Mitchel Polte, 173 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1138-8

Trockeneisstrahlen als Vorbehandlungsverfahren vor dem Galvanisieren

El Mustapha Baira, 171 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1157-9

Umweltbewertung und Ökoeffizienz beim Metall-Schutzgasschweißen von Dickblechverbindungen

Gunther Sproesser, 179 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1175-3

Einflussfaktoren der Reinigung mit flüssigem Kohlendioxid auf fertigungsrelevante Materialeigenschaften medizintechnischer Kunststoffe

Johannes Mankiewicz, 166 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1180-7

Simulationsmodell als Basis zur Ableitung von Zerspanstrategien zur Reduzierung von thermischen Bearbeitungseinflüssen beim Hartdrehen

Ivan Mitkov Ivanov, 166 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1201-9

Adaptives Entwicklungstool zur intelligenten Konfigurierung von Condition-Monitoring-Algorithmen

Abdelhakim Laghmouchi, 176 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1222-4

Die-Sinking EDM of High Aspect Ratio Cavities in Nickel-Base Alloy

David Carlos Domingos, 249 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1163-0

Kinematisch modulierte Schleifprozesse zur Strukturierung von tribologisch beanspruchten Funktionsoberflächen

Clemens Bäcker, 204 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1235-4

Resource-Optimized Verification Planning for Mechatronic Systems in the Virtual Stage of Product Creation

Frank Gerhorst, 185 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1255-2

Wissensbasierte Entwicklung nachhaltiger Produkte

Kai Lindow, 246 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1271-2

Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie und dessen Umsetzung an Produktionsstandorten in der Volksrepublik China unter Berücksichtigung kultur- und kooperationsbedingter Einflüsse

Oliver Linthe, 190 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1276-7

Gestaltungsaspekte immersiver Fahrsimulationsumgebungen

Diana Reich, 258 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1283-5

Benchmarking-unterstützte Standortplanung von industriellen Wertschöpfungsprozessen

Xing Zhou, 226 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1296-5

Einsatzverhalten und Leistungsbedarfe unterschiedlicher Kühlmethoden beim Außen-Längs-Runddrehen

Paul Fürstmann, 178 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1317-7

Grinding of high performance materials with spherical mounted point

Stefan Koprowski, 160 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1311-5

Methodik zur integrierten virtuellen Auslegung und Absicherung flexibler Bauteile

Nicolas Hofheinz, 248 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1298-9

Trotz der großen wirtschaftlichen Bedeutung des Schienenschleifens ist dieses Reparaturverfahren aus der Sicht der Fertigungstechnik kaum wissenschaftlich erforscht. Das Ziel der Arbeit ist es, ein Grundverständnis des Wirkzusammenhanges relevanter Einflussgrößen und Bearbeitungsergebnissen zu gewinnen und daraus die Empfehlungen zur Prozessgestaltung hinsichtlich des wirtschaftlich sinnvollen Schienenbetriebes nach der Schleifbearbeitung abzuleiten.

ISBN 978-3-8396-1306-1



FRAUNHOFER VERLAG