

Simon Gábor Kelemen

**Potentiale der Schallemissionsanalyse zur
Charakterisierung von trockenlaufenden
Friktionssystemen**

Potentials of acoustic emission analysis for
characterization of dry running friction systems

Band 56

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Hrsg.: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Forschungsberichte



Simon Gábor Kelemen

**Potentiale der Schallemissionsanalyse zur
Charakterisierung von trockenlaufenden Frikti-
onssystemen**

Potentials of acoustic emission analysis for charac-
terization of dry running friction systems

Band 56

Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2012
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

Potentiale der Schallemissionsanalyse zur Charakterisierung von trockenlaufenden Friktionssystemen

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Simon Gábor Kelemen
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Juli 2012

Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert. Albers

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK Institut für Produktentwicklung Karlsruhe (ehemals: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von hochbelasteten Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie von Lager- und Funktionsreibsystemen, die Mikrosystemtechnik mit dem Focus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

Vorwort zu Band 56

Friktionssysteme, also technische Systeme, bei denen die Reibung zur Funktionserfüllung genutzt wird, wie z. B. Bremsen oder Kupplungen in Antriebssträngen, stellen eine sehr wichtige Klasse von Maschinensystemen dar. Zentral für ihre Funktionserfüllung ist das Wirkflächenpaar im Friktionskontakt. Nur durch einen ausreichend großen Reibwert und einen nicht so hohen Verschleiß kann die Gebrauchsdauer entsprechend den Nutzungsrandbedingungen dimensioniert werden. Insbesondere bei ungeschmierten, sog. trockenen Friktionssystemen, kommt der Charakterisierung des tribologischen Zustandes im Wirkflächenpaar eine hohe Bedeutung zu. Das Problem für eine Untersuchung des tribologischen Verhaltens „in Situ“ ist die Zugänglichkeit des Wirkflächenpaares im Betrieb. Möglich sind heute Temperaturmessungen durch eingeklebte Thermolemente oder auch die Messung der Wärmestrahlung. Wenn auch nur gering, so wird trotzdem das Tribosystem durch diese Messung gestört bzw. beeinflusst. Eine Online-Verschleißmessung ist bisher nur durch die sog. Radionuklid-Messtechnik möglich. Dabei wird ein Partner im Wirkflächenpaar aktiviert und dann im Betrieb die Radioaktivität in zum Beispiel dem Ölstrom geeignet gemessen. Dies Verfahren ist sehr aufwendig und bisher nur bei geschmierten Systemen im Einsatz. Eine Messung des Verschleißes zu bestimmten Zeitpunkten durch Unterbrechung des Betriebes ist oftmals ebenfalls mit Störungen des Tribosystems verbunden. In Arbeiten russischer Wissenschaftler wurde bereits im vorigen Jahrhundert die Schallemissionsanalyse von Körperschall bei Friktionskontakten untersucht. Diese Arbeiten fanden auf Stift-Scheibe-Tribometern statt und zeigten ein erhebliches Potential, die Vorgänge in einem reibungsbehafteten Wirkflächenpaar unter Relativbewegungen zu erfassen. An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Simon Gábor Kelemen an. Er erforscht in einer grundlegenden Untersuchung das Potential der Schallemissionsanalyse zur Charakterisierung von trockenlaufenden Friktionssystemen und leitet daraus, soweit möglich, eine neue Methode zur Beurteilung des tribologischen Zustandes trockenlaufender Friktionssysteme ab. Die Arbeit hat einen hohen Neuheitsgrad und liefert wichtige neue Impulse für die Tribologiemesstechnik.

Albert Albers

Kurzfassung

Körperschallanalysen von tribologischen Systemen bieten große technische und ökonomische Potentiale. Methoden, die auf der Analyse von Schwingungen und Körperschallemissionen basieren, stellen in der industriellen Praxis heute die Standardverfahren zur Überwachung von Maschinen und Prozessen dar. Die Möglichkeiten der Diagnostik und Überwachung werden hierbei allerdings bei weitem nicht ausgeschöpft. Viele Erkenntnisse aus der Analyse von Körperschallemissionen zur Charakterisierung von trockenlaufenden Friktionssystemen haben bis heute den Sprung in die industrielle Anwendung nicht geschafft und sind auf der untersten Evolutionsstufe der tribologischen Reihe geblieben. Im Gegensatz zu anderen Verfahren zur Online-Verschleissmessung und Oberflächencharakterisierung hat sich die Körperschallanalyse noch nicht in vergleichbarer Breite durchgesetzt, da das Verfahren immer noch ein Akzeptanzproblem hat. Allerdings hat sie jedoch das Potential, andere meist aufwendigere und teurere Online-Verfahren zu ergänzen oder gar zu ersetzen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Applikation der Körperschallemissionsanalyse im Ultraschallbereich an tribologischen Systemen, insbesondere an der aus Sicht der industriellen Anwendung bedeutenden Analyse von organischen Reibbelägen.

Hierzu wird zuerst an einer Reibpaarung Metall/Metall die Übertragbarkeit der bisherigen Erkenntnisse aus den Stift-Scheibe-Analysen aus der Literatur nachgewiesen, um diese anschließend auf Verbundwerkstoffe, wie organische Reibbeläge, zu übertragen. Zeitgleich werden die Werkstoffeigenschaften den erhaltenen Ultraschallsignalen gegenübergestellt und Abhängigkeiten aufgezeigt. Ebenso wird gezeigt, dass sich mit Hilfe der Körperschallanalytik im Ultraschallbereich die realen reibaktiven Bereiche zwischen zwei Oberflächen detektieren lassen. Eine Gegenüberstellung mit Referenzverfahren verdeutlicht die Eignung des Verfahrens zur Charakterisierung von tribologischen Prozessen und Verschleiß an Oberflächen. Der Frequenzinhalt ist dabei von entscheidender Bedeutung und das Schallsignal wird im Gegensatz zum Stand der Forschung zur Analyse in einzelne Frequenzbänder aufgeteilt. Erst diese Auftrennung ermöglicht differenzierte Aussagen durch das Körperschallsignal und bietet einen entscheidenden Mehrwert.

Abstract

Acoustic emission analyses of tribological systems hold great technic and economic potential. These kind of methods based on vibrations and acoustic emissions, are state of the art in industry to monitor machines and manufacturing processes. Yet, the analysis possibilities for monitoring and diagnostics are not fully exploited. Eventhough there has been a lot of scientific research about acoustic emission analyses for characterizing dry running tribological systems, the knowledge has not been transferred into industrial practise. Thus development of the acoustic emission analyses remains at the lowest stage of the tribological row. In contrast to other online wear measurement methods and surface characterization tools the acoustic emission analysis fails because of its lack of acceptance. However, it offers the possibility to supplement or even replace other more complex and expensive online analysis methods.

This thesis presents the acoustic emission analysis as a potential tool to monitor and analyze tribological systems in the ultrasonic frequency area, especially for analyzing organic friction materials, which are important for industrial applications. First, the transferability of the findings from pin-disc-experiments which are state of the art was verified by examining metal/metal friction pairs. In a second step these results are compared with composite friction materials.

Additionally the material characteristics are correlated with the ultrasonic signals to identify dependencies. The work also shows that the acoustic emission signal reveals rub active areas between two surfaces. A comparison between reference methods and the acoustic emission analysis method shows the possibilities of this method to characterize tribological processes and wear. In contrast to the current state of the art, the emission signal is separated into different frequency ranges before analysis. This frequency separation enables conclusions on different tribological effects and gives the important additional value in difference to the state of the art.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers für die wissenschaftliche Betreuung und insbesondere für das in mich gesetzte Vertrauen und die mir stets gewährten Freiräume.

Für die Übernahme des Koreferats und alle damit verbundenen Mühen danke ich sehr herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld.

Mein Dank gilt außerdem allen Kollegen am IPEK, sowohl den wissenschaftlichen Mitarbeitern, als auch den Mitarbeitern im administrativen Bereich und allen Mitarbeitern der Institutswerkstatt, ohne deren Hilfe viele Ideen zu dieser Arbeit nur sehr schwer umsetzbar gewesen wären.

Ein weiteres Dankeschön gilt auch Herrn Volker Zibat vom Laboratorium für Elektronenmikroskopie für seine große Hilfsbereitschaft und sein Engagement.

Zuletzt möchte ich mich bei allen bedanken, die in meinem privaten Umfeld zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonderer Dank gilt hier meiner Frau, die immer ein wertvoller Diskussionspartner war und mich stets nach Kräften unterstützt hat, sowie meinen Eltern und meinem Bruder, die immer voller Vertrauen hinter mir und meiner Arbeit standen.

Karlsruhe, den 19. Juli 2012

Simon Gábor Kelemen

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1	Technische Systeme und Produktentstehung	3
2.1.1	Der Contact & Channel Ansatz.....	4
2.1.2	Das integrierte Produktentstehungs-Modell.....	5
2.1.3	Tribologische Prüfkette	8
2.2	Tribologie	12
2.2.1	Allgemeine Definition	12
2.2.2	Tribotechnisches System	13
2.2.3	Tribologische Beanspruchung.....	14
2.2.4	Technische Oberflächen	15
2.3	Reibung	18
2.3.1	Grundlagen und Übersicht	18
2.3.2	Reibungsmessgrößen	19
2.3.3	Reibungsmechanismen.....	21
2.3.4	Reibungsarten.....	23
2.4	Verschleiß.....	25
2.4.1	Grundlagen und Übersicht	25
2.4.2	Verschleißmessgrößen	26
2.4.3	Verschleißmechanismen	27
2.4.4	Verschleißarten	29
2.5	Körperschallemissionen	30
2.5.1	Grundlagen	30
2.5.2	Entstehung und Ausbreitung von Körperschall.....	31
2.5.3	Dämpfung	34
2.6	Reibpaarungen in trockenlaufenden Friktionssystemen	37
2.6.1	Definition und Funktionsweise.....	37
2.6.2	Verbundwerkstoffe	39
2.6.3	Verschleißverhalten von organischen Reibbelägen.....	48
2.7	Analysemöglichkeiten an Friktionssystemen	48
2.7.1	Online-Analyse-Möglichkeiten bei nasslaufenden Friktionssystemen.....	49
2.7.2	Online-Analyse-Möglichkeiten bei trockenlaufenden Friktionssystemen.....	51
3	Zielsetzung	65
4	Verwendete Handlungssysteme	69
4.1	Eingesetzte Werkstoffe	69

4.1.1	Metalle	69
4.1.2	Verbundwerkstoffe	70
4.2	Eingesetzte Messtechnik	72
4.2.1	Zur Körperschallerfassung eingesetzte Messtechnik.....	72
4.2.2	Radionuklidtechnik	76
4.2.3	Thermografiekamera.....	76
4.2.4	Weißlichtinterferometer	78
4.2.5	REM + EDX-Analyse.....	79
4.3	Eingesetzte Prüfstände	81
4.3.1	Trockenreibmodellprüfstand (TRM 1.0) am IPEK	81
4.3.2	Trockenreibmodellprüfstand (TRM 2.0) an der IAVF	83
4.4	Versuchsplanung und -durchführung	89
5	Körperschalluntersuchungen	93
5.1	Einfluss der Sensorposition auf das Schallsignal	93
5.2	Einfluss des Materials auf das Schallsignal.....	96
5.2.1	Einfluss von Metallen	97
5.2.2	Einfluss von Verbundwerkstoffen	104
5.3	Einfluss des Drehmoments auf das Schallsignal	108
5.3.1	Einfluss bei Metallen	109
5.3.2	Einfluss bei Verbundwerkstoffen	110
5.4	Einfluss der Drehzahl auf das Schallsignal.....	112
5.4.1	Einfluss bei Metallen	112
5.4.2	Einfluss bei Verbundwerkstoffen	114
5.5	Einfluss der Geometrie auf das Schallsignal	116
5.5.1	Einfluss bei unterschiedlichen Materialien.....	121
5.5.2	Einfluss von geometrischen Formen	123
5.6	Einfluss von Anomalien auf das Schallsignal	126
5.6.1	Kombinierte Körperschallsignalerfassung von Verschleiß und Geometrie.....	128
6	Validierung.....	131
6.1	Validierung mit Hilfe der Radionuklidtechnik	132
6.2	Validierung mit Hilfe der Thermografiekamera	134
7	Fazit.....	138
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	142
8.1	Zusammenfassung	142
8.2	Ausblick	144
9	Literaturverzeichnis.....	148
10	Anhang.....	166

Symbolverzeichnis

Symbol Beschreibung

c	Schallgeschwindigkeit
c_p	spezifische Wärmekapazität
d	Durchmesser
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
f	Frequenz
F_N	Normalkraft
f	Proportionalitätsfaktor
F_R	Reibungskraft
M	Drehmoment
M_R	Reibmoment
M_R	Materialanteil
n	Drehzahl
P	Leistung
P_R	Reibleistung
R_a	Mittenrauhwert
R_z	Gemittelte Rauhtiefe
r	Radius
T	Messdauer
t	Zeit
t	Dicke
T	Temperatur
T_s	Schmelzpunkt
L	Länge
s	Weg

U	elektrische Spannung
v	Geschwindigkeit
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit
W_R	Reibungsarbeit
x	Koordinate
y	Koordinate
Z	akustische Impedanz
z	Koordinate
μ	Reibungskoeffizient
ρ	Dichte
ρ	Reibungswinkel
τ	Schubspannung
τ_R	Reibschubspannung
τ_{Grenz}	Grenzschubspannung
W_{rel}	Winkelgeschwindigkeit

1 Einleitung

Um im globalen Wettbewerb bestehen zu können, ist das technologische Innovationsvermögen für Industrieunternehmen und industrielle Volkswirtschaften heute von extrem wichtiger Bedeutung.

Für die Produktentwicklung, z.B. in der Fahrzeugbranche, ergeben sich dabei immer komplexere Herausforderungen. Durch die zunehmende Interdisziplinarität und die gesellschaftlichen Megatrends bieten sich jedoch auch neue Aspekte und Chancen. Die heutigen Fahrzeuge haben eine immer größere Leistungsdichte bei größerem Komfort und besserer Umweltverträglichkeit. Vor allem durch die kontinuierlich wachsende Umwelt- und Ressourcensensibilität der Verbraucher, steht eine Optimierung hinsichtlich Leichtbau und Energieeffizienz mittlerweile an zentraler Stelle bei der Entwicklung.

Dies betrifft in hohem Maße Verschleißteile, wie z.B. Bremsbeläge, deren Wechsel zu den häufigsten Serviceaufgaben in den Werkstätten gehört. Die durch den Abrieb von Reifen, Bremsen und Straßenbelag verursachten Emissionen lagen 2008 für PM₁₀, d.h. Partikel kleiner 10µm, mit 9,6 % (19,52 kt) über dem Anteil der verbrennungsbedingten Emissionen¹. Der Bremsabrieb mit 5500-8500t/Jahr überwiegend PM₁₀ ist einer der Hauptverursacher des anthropogenen Anteils am Feinstaub in Deutschland². Diese Abriebemissionen sind von der Fahrleistung abhängig und entwickeln sich parallel zu dieser seit Jahren stetig nach oben.

Bei der Entwicklung von Reibbelägen spielen nicht nur die thermische Leistungsfähigkeit, Festigkeit, Verschleiß und Reibwerthöhe eine Rolle. Darüber hinaus sollen die Beläge durch niedrigen Emissionswerte hinsichtlich Geräuschpegel, Schwingungsverhalten und Abrieb bis hin zur umweltschonenden Produktion überzeugen.

Die Entwicklung eines neuen Reibbelags kann bis zu 30 verschiedene Grundmaterialien beinhalten, umfasst aufwendige Testreihen und dauert bis zu drei Jahre³.

Das veränderte Umweltbewusstsein führt dazu, dass andere Werkstoffkombinationen als die bisher verwendeten Blei- und Antimonverbindungen oder veränderte Herstellungsverfahren wie eine lösemittelfreie Herstellung von faserdurchzogenen

¹ (UMWELTBUNDESAMT, 2011)

² (GREENPEACE, 2005)

³ (HONEYWELL FRICTION MATERIALS, 2010)

Kupplungsbelägen zum Einsatz kommen. Dies führt jedoch auch zu anderem Reibverhalten und Komfoteigenschaften.

Die Tests und Untersuchungen solcher zukünftiger Beläge sind wichtig und für die Bewertung unabdingbar. Sie dienen dazu, das nötige Wissen im Bereich der Tribologie, Grenzflächentechnologie und der Verfahrenstechnik zur Herstellung von Composites zu vertiefen. Diese Tests und vor allem deren Analysen sind jedoch aufwendig, zeit- und kostenintensiv. Zur Unterstützung der Entwickler sind Werkzeuge nötig, wie Modelle für die Simulation oder Online-Analysemethoden für die tribologischen Prozesse im Kontakt oder für die reibaktiven Oberflächen, die Zeit und Kosten einsparen. Ein solches Werkzeug kann die Schallemissionsanalyse sein, die bisher in zahlreichen Grundlagenuntersuchungen ihr Potential zur Charakterisierung von tribologischen Prozessparametern aufgezeigt hat⁴, allerdings bis heute nicht mit all ihren Möglichkeiten zum Einsatz kommt.

Da Verschleiß und Reibungsprozesse von Schallemissionen begleitet werden, bietet sich deren Analyse an und stellt heute in vielen Anwendungsbereichen das Mittel der Wahl zur Erkennung unterschiedlichster Schadensbilder und Fehler dar⁵. Dem gegenüber stehen aber oft ein unzureichendes Verständnis und die daraus folgende Fehleinschätzung der Leistungsfähigkeit. Während die Körperschallanalyse insbesondere für die Wälzlagerüberwachung und Prozessüberwachung bei Werkzeugmaschinen bereits große Bedeutung erlangt hat, wird sie bei tribologischen Untersuchungen oder in der Industrie als unterstützendes Werkzeug bei Entwicklungen, trotz prinzipieller Eignung, gar nicht bis wenig eingesetzt.

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur realistischen Bewertung der Potentiale der Körperschallanalyse zur Untersuchung trockenlaufender Friktionskontakte leisten und die Anwendbarkeit, sowie deren Grenzen, am Beispiel trockener metallischer und organischer Reibpaarungen beleuchten.

⁴ z.B. (ALBERS & DICKERHOF, 2007; ALBERS u. a., 2001; KURZ u. a., 2005; OREND & MEYER, 2009; SCHWALBE, 1978; SCHWER u. a., 2007)

⁵ z.B. (GROSSE, 2002)

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Dieses Kapitel beginnt mit einer kurzen Einführung in das Gebiet der technischen Systeme und erklärt den Produktentstehungsprozess eines solchen Systems. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf den Validierungsprozess gerichtet, in dem die tribologische Prüfkette erläutert und auf deren Umsetzung am IPEK eingegangen wird. Darauf aufbauend gibt dieses Kapitel einen kurzen Überblick über das Feld der Tribologie mit ihren Forschungsteilen Reibung und Verschleiß und legt die Grundlage für das Verständnis der eigentlichen Arbeit. Im weiteren Verlauf gibt es einen Überblick des für diese Arbeit relevanten Stands der Forschung zu Ergebnissen von Körperschallemissionsanalysen trockenlaufender tribotechnischer Systeme. Die hier dargestellte Sicht der aktuellen Situation bildet die Grundlage für die in Kapitel 3 abgeleiteten Ziele der Arbeit.

2.1 Technische Systeme und Produktentstehung

Unter Berücksichtigung von definierten Systemgrenzen können technische Systeme durch ihre Ein- und Ausgangsgrößen beschrieben werden. Abbildung 2.1 stellt die Funktionserfüllung, bzw. das Erreichen der gewünschten Systemeigenschaft unter Einbeziehung des systemtheoretischen Modellansatzes⁶ mit Ein- und Ausgangsgrößen der drei Kategorien Energie, Materie oder Information dar. Auf Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen wird nun im folgenden Kapitel genauer eingegangen.

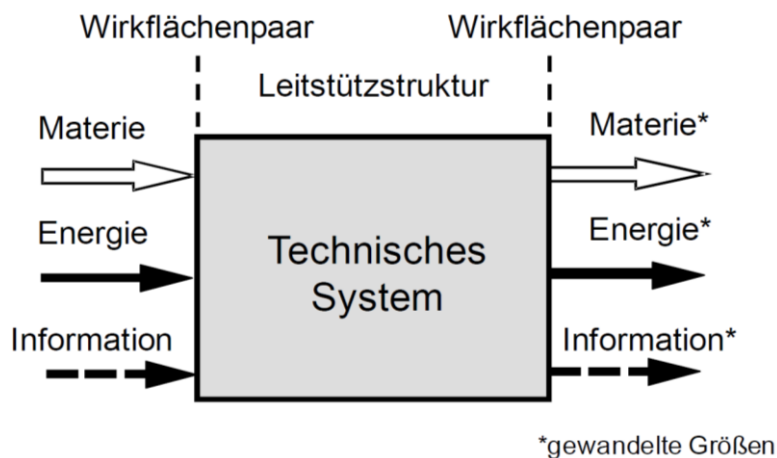


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines technischen Systems⁷

⁶ (ROPOHL, 1975)

⁷ (SCHYR, 2006)

2.1.1 Der Contact & Channel Ansatz

Im Gegensatz zu beispielsweise technischen Zeichnungen bietet der Contact und Channel Ansatz nach ALBERS⁸ die Möglichkeit, ein System einschließlich der Verknüpfungen von Funktion und Gestalt von abstrakter bis hin zur durchgestalteten Ebene zu beschreiben. Dieser Ansatz baut auf den Arbeiten renommierter Konstruktionsmethodiker wie REULEAUX⁹, RODENACKER¹⁰, ROTH¹¹, KOLLER¹², KASTRUP¹³ und HUBKA¹⁴ auf. Vor allem MATTHIESEN¹⁵ und ALINK¹⁶ leisten neben anderen wesentliche Beiträge zu dieser einfachen und universellen Sprache für die strukturierte Analyse und Synthese technischer Systeme.

Die für die Modellierung eingesetzten Elemente sind Wirkflächen, Wirkflächenpaare, Leitstützstrukturen, Connectoren, Tragstrukturen, Reststrukturen und Begrenzungsflächen, die wie folgt definiert sind:

- „Wirkflächen (WF) sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise im Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und am Energie-, Stoff- und Informationsaustausch des technischen Systems beteiligt sind.“¹⁷
- „Wirkflächenpaare (WFP) werden aus genau zwei Wirkflächen gebildet, die zeitweise, ganz oder teilweise in Kontakt stehen und zwischen denen Energie, Stoff und Information übertragen wird.“¹⁸
- „Leitstützstrukturen (LSS) sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzte Räume, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und dauernd oder zeitweise eine Leitung von Energie, Stoff oder Information zwischen den Wirkflächen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes ermöglichen.“¹⁹
- „Connectoren repräsentieren die relevante Umwelt des betrachteten Systems. Sie beschreiben und beinhalten „alle Einflussgrößen, Parameter, Randbedin-

⁸ (ALBERS u. a.\scaps, 2005a);(ALBERS u. a., 2004); (MATTHIESEN, 2002)

⁹ (REULEAUX, 1882)

¹⁰ (RODENACKER, 1991)

¹¹ (ROTH, 2000a); (ROTH, 2000b)

¹² (KOLLER & RUDOLF, 1998)

¹³ (KOLLER & KASTRUP)

¹⁴ Hubka (1996)

¹⁵ (MATTHIESEN, 2002)

¹⁶ Alink (2010)

¹⁷ (MATTHIESEN, 2002)

¹⁸ (MATTHIESEN, 2002)

¹⁹ Nach Albers, vgl. (MATTHIESEN, 2002)

gungen und deren Vernetzung für die an der Grenze des Systems vorhandenen Wirkflächen.“²⁰

- „Tragstruktur (TS) ist die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen.“²¹
- „Reststrukturen (RS) sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felderfüllten Räumen, die niemals Tragstruktur sind.“²²
- „Begrenzungsflächen (BF) sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die nie Wirkflächen werden“²³
- Nach den dem C&C²-Ansatz zugrundeliegenden Hypothesen können Effekte wie z.B. Reibung, Kraft oder Informationsübertragung nur stattfinden, wenn eine Wirkfläche in Kontakt mit einer weiteren Wirkfläche steht, also sich ein Wirkflächenpaar gebildet hat. Zur Erfüllung einer Funktion, sind deshalb mindestens zwei WFP, eine sie verbindende LSS, sowie mindestens zwei Connectoren für die Anbindung an die Umgebung erforderlich.

2.1.2 Das integrierte Produktentstehungs-Modell

Das Ziel eines jeden Unternehmens ist es ein marktfähiges Produkt zu entwickeln. Die dabei ablaufende Produktentstehung ist dabei von wiederkehrenden Abläufen gekennzeichnet, die in Modellen von Produktentstehungsprozessen beschrieben werden.

Das „integrierte Produktentstehungsmodell iPeM“ (siehe Abbildung 2.2) ist ein Prozessmodell, welches die Aspekte der integrierten Produktentwicklung in einem konsistenten Metamodell zusammenführt, d.h. es hat einen generischen Charakter und es können für individuelle Problemstellungen Modelle abgeleitet werden. Der Ansatz des iPeM basiert auf fünf Hypothesen, die auf langjährigen Erfahrungen in Entwicklungsprojekten mit Industriepartnern beruhen. Die Hypothesen sind im Folgenden aufgeführt. Für detailliertere Erläuterungen sei auf ALBERS²⁴ verwiesen.

- **Individualität von Produktentstehungsprozessen**

Jeder Produktentstehungsprozess ist einzigartig und individuell. Es gibt niemals zwei identische Entstehungsprozesse, denn Randbedingungen,

²⁰ Nach Albers, s. (ALINK, 2010) Kap. 7.3.2

²¹ (MATTHIESEN, 2002)

²² (MATTHIESEN, 2002)

²³ Vgl. Albers / (MATTHIESEN, 2002)

²⁴ (ALBERS, 2010); (ALBERS u. a., 2010a); (ALBERS u. a., 2010b); (ALBERS u. a., 2010c); (ALBERS u. a., 2010e)

Zielsetzungen, unvorhergesehene Schwierigkeiten und subjektiv operierende/veränderte Handlungssysteme führen immer zu einem einzigartigen Verlauf. Entstehungsprozesse können zwar ähnlich ablaufen, allerdings ihre Ausprägungen und Beziehungen untereinander von Prozess zu Prozess sind immer individuell.²⁵ Dabei bleibt das Metamodell strukturell erhalten, aber die Produktentstehung führt immer zu einzigartigen Beziehungen und Informationsflüssen zwischen den Elementen. **(1. Hypothese)**

- **System der Produktentstehung**

Auf den Grundlagen der Systemtheorie lässt sich eine Produktentstehung als die Transformation eines (anfängs vagen) Zielsystems in ein konkretes Objektsystem²⁶ durch ein Handlungssystem²⁷ beschreiben. Das Zielsystem umfasst die geplanten Eigenschaften des Produkts sowie alle Restriktionen, Abhängigkeiten und Randbedingungen. Im Zielsystem wird der gewünschte zukünftige Zustand beschrieben und die Abhängigkeiten der Ziele untereinander (sich widersprechende Ziele, Zielkonflikte,...), sowie getroffene Entscheidungen, die das realisierte Anwendungsprozessmodell in seiner Abweichung vom Implementierungsprozessmodell nachvollziehbar machen. Während der Produktentstehung wird das Zielsystem permanent erweitert und konkretisiert. Das Objektsystem beinhaltet neben dem entwickelten Produkt auch sämtliche Dokumente, Zeitpläne, Teillösungen etc. Es gilt als vollständig, wenn der geplante Zielzustand erreicht wird. Das Handlungssystem enthält alle notwendigen Ressourcen für die Entwicklung des geplanten Ziels. Objekt- und Zielsystem sind ausschließlich über das Handlungssystem miteinander verbunden. **(2. Hypothese)**

- **Validierung**

Die Validierung ist die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess. Es beschreibt den kontinuierlichen Verfeinerungsprozess des Objektsystems und führt zum Erfolg des Produkts durch kontinuierlichen Vergleich mit den geforderten Zielen des Systems. Nur durch die Validierung kann Wissen generiert werden. **(3. Hypothese)**

²⁵ (ALBERS u. a., 2010e)

²⁶ Das Objektsystem beinhaltet alle Informationen über das Produkt, mitsamt den Interaktionen mit dem Supersystem (technisch, sozio-technisch und sozial).

²⁷ Das Handlungssystem kann als fraktales, sozio-technisches System angesehen werden, das alle Subprozesse erfasst.

- **Zielbeschreibung in der Problemlösung**

Die Objekte, die in Produktentstehungsprozessen erstellt werden, müssen hinsichtlich der gewünschten Produktfunktionen, die Teil des Zielsystems sind, beschrieben werden, um die Ziele transparent zu halten. Die Funktion eines technischen Systems kann, wie vorher beschrieben immer auf die Wechselwirkung von Wirkflächenpaaren und den sie verbindenden Leit-Stütz-Strukturen zurückgeführt werden. **(4. Hypothese)**

- **Beschreibung von Funktionen**

Eine technische Funktion benötigt immer mindestens zwei Wirkflächenpaare und die sie verbindende Leitstützstruktur. Ein System kann seine Funktion(en) nur in Wechselwirkung mit seiner Umgebung erfüllen. Ein System, das keine WFP mit seiner Umgebung bildet, erfüllt keine Funktion. Man kann auch sagen, in einem Produktentstehungsprozess werden WFP gestaltet – ein Bauteil alleine hat keine Funktion, da es in keinem Kontext steht. **(5. Hypothese)²⁸**

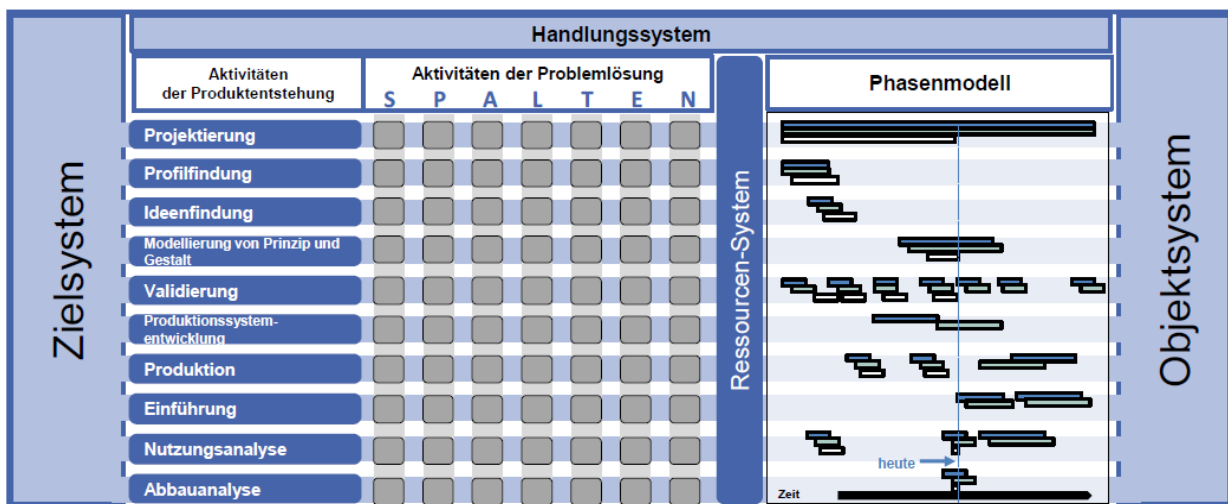


Abbildung 2.2: Das integrierte Produktentstehungsmodell IPeM²⁹

Im iPeM sind einzelne Aktivitäten der Produktentstehung mit einem Problemlösungszyklus verknüpft³⁰. Dadurch entsteht eine Ordnungsstruktur, die zur Orientierung im Prozess dient, und eine problemadäquate Bereitstellung von Methoden und Werkzeugen ermöglicht.³¹ Im iPeM können weiterhin komplexe Zielsysteme mit unterschiedlichsten Zielbeziehungen modelliert werden. Damit ist es möglich, die

²⁸ Die Hypothesen gründen auf dem C&C²-Ansatz: (ALBERS u. a., 2008)

²⁹ (ALBERS u. a., 2010b)

³⁰ (ALBERS u. a., 2002).

³¹ (ALBERS & MEBOLDT, 2007)

Aktivitäten, die zur Überführung der Ziele in ein Objektsystem dienen, (unter Einbeziehung von Ressourcen) dynamisch zu planen und zu überwachen.

Da die Validierung ein zentraler Punkt bei der Entwicklung neuer Methoden und Prozesse ist, soll ihre Funktion noch einmal genauer erläutert werden.

Validierung – Zentrale Aktivität

Die aufgeführte Hypothese stellt die Aktivität Validierung als zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess dar. Die Validierung muss den Produktentstehungsprozess kontinuierlich bei jedem einzelnen Schritt begleiten. Diese Aktivität beinhaltet einen kontinuierlichen (siehe Abbildung 2.2) Vergleich des Ist- (Objektsystem) und des Sollzustandes (Zielsystem). Die Validierung ist somit einerseits eine Lebenszyklusphase, andererseits ist sie auch eine wiederkehrende Aktivität innerhalb jedes einzelnen Prozessschritts. Die Validierung ist die Aktivität, in der Wissen geschaffen wird und für weitere oder neue Entwicklungen bereitgestellt wird. Die Validierung versteht sich also nicht nur als Abgleich der physikalischen Eigenschaften des Produkts in der Simulation oder im Prototypenversuchen (Validierung als Lebenszyklusphasen), sondern beispielsweise auch als Aktivität während der Iteration der Modellierung von Prinzip und Gestalt (Validierung als Aktivität des Lebenszyklus).

Mit dem Fokus auf Fahrzeuggesamt- oder Teilsystemen ist hier die Validierung aufwendig und muss möglichst früh im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden, um Zeit und Kosten zu sparen.

Für die Entwicklung und Validierung tribologischer Werkstoffe, wie z.B. Reibbelägen kommt der tribologischen Prüfkette³² dabei eine hohe Bedeutung zu. Hierbei ist es wichtig, nicht nur für sich genommen den tribologischen Kontakt zu untersuchen, sondern das tribologische System ganzheitlich zu betrachten und die Anwendung miteinzubeziehen und hinzuzusimulieren.

2.1.3 Tribologische Prüfkette

Die tribologische Mess- und Prüftechnik, oder auch *Tribometrie genannt*, geht von Untersuchungen an vollständigen technischen Systemen unter realen Betriebsbedingungen bis hin zu labormäßigen Modellprüfungen mit einfachen Probekörpern. Sie betrifft dabei alle technischen Bereiche, egal welcher Skalierung; die Makrotechnik, die Mikrotechnik und die Nanotechnik. Unter Berücksichtigung u.a. der Funktion und

³² Erklärung hierzu Kap. 2.1.3

Struktur tribotechnischer Systeme und Bauteile ist die tribologische Prüftechnik – speziell die Verschleißprüfung – in sechs unterschiedliche Kategorien einzuteilen.³³

„I. Betriebsversuch

Prüfung und Untersuchung originaler kompletter tribotechnischer Systeme unter originalen Betriebs- und Beanspruchungsbedingungen („Feldversuch“)

II. Prüfstand-Versuch

Prüfung und Untersuchung originaler kompletter tribotechnischer Systeme unter praxisnahen Betriebsbedingungen auf einem Prüfstand

III. Aggregat Versuch

Prüfung und Untersuchung originaler Einzelaggregate unter praxisnahen Betriebsbedingungen

IV. Bauteil-Versuch

Bauteiluntersuchungen (Original-Bauteile oder vereinfachte Bauteile) unter praxisnahen Betriebsbedingungen

V. Probekörper-Versuch

Beanspruchungsähnlicher Versuch mit bauteilähnlichen Probekörpern

VI. Modell-Versuch

Grundlagenorientierte Untersuchung von Reibungs- und Verschleißprozessen mit speziellen Probekörpern unter beliebigen, aber definierten Beanspruchungen“

Hierbei stellt eine höhere Kategorie jeweils eine Vereinfachung des Systems bezüglich des Beanspruchungskollektivs und/oder der Struktur des betreffenden Systems gegenüber der vorhergehenden Kategorie dar.

In Kategorie I. bis III. bleibt die Systemstruktur des zu prüfenden originalen tribologischen Aggregates erhalten und nur das Beanspruchungskollektiv, die Summe aller Beanspruchungen, wird vereinfacht. Von Kategorie IV. bis VI. wird auch die Systemstruktur immer stärker verändert mit dem Nachteil der sinkenden Sicherheit der Übertragbarkeit der Prüfergebnisse auf vergleichbare praktische tribotechnische Systeme. Vorteile sind der messtechnisch immer besser zugängliche Kontaktbereich, sowie die geringeren Prüfkosten und –Zeiten. Die Vorteile der einzelnen Kategorien macht man sich zunutze, indem man tribologische Messungen

³³ (GfT, 2011)

und Prüfungen in der Prüfkette durchführt. Beim Übergang von einer in die andere Kategorie müssen u.a. folgende Korrelationsprüfungen durchgeführt werden:

- Vergleich der Verschleißerscheinungsformen bzw. Verschleißmechanismen
- Vergleich von Verschleißraten
- Vergleich von Bewährungsfolgen von Werkstoffen, Schmierstoffen, konstruktiven Varianten

Die Prüfkette muss für den jeweiligen Feldeinsatz tribotechnischer Erzeugnisse individuell entwickelt und durch geeignete Korrelationsprüfungen abgesichert werden.³⁴

Am IPEK ist dieser experimentelle Analyseansatz durch die Integration von Simulation in eine Validierungsprozesskette³⁵ überführt worden. Diese Validierungsprozesskette, konsequent umgesetzt in einem XiL-Ansatz³⁶ (s. Abbildung 2.3), bietet außer dem Einsatz als Analysemethode noch dazu die Möglichkeit, anwendungs- und anwenderspezifische Fragestellungen im Verlauf der Entwicklung und Validierung neuer Systemlösungen zu erforschen.³⁷

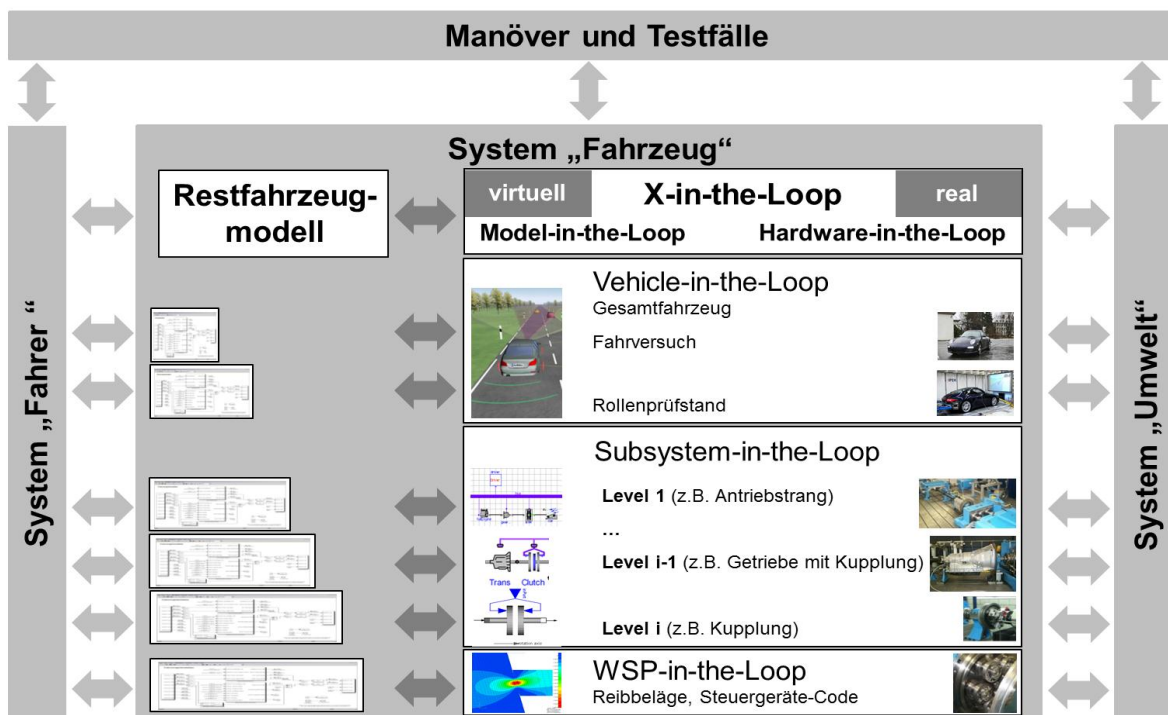


Abbildung 2.3: IPEK-Validierungsprozesskette mit XiL-Ansatz

³⁴ (MITARIU-FALLER, 2009)

³⁵ (ALBERS u. a., 2007a)

³⁶ (GEIER u. a., 2009) - XiL: X-in-the-Loop; „X“ steht für das jeweilige Teilsystem, wie einzelne Antriebsstrangkomponenten oder auch ein gesamtes Fahrzeug, das betrachtet werden soll.

³⁷ (BEHRENDT, 2009)

Der XiL-Ansatz verkörpert den in der Validierung geforderten Ansatz das tribologische System ganzheitlich zu betrachten und die Anwendung miteinzubeziehen und hinzuzusimulieren.

In Abbildung 2.4 ist ein Beispiel der tribologischen Kette innerhalb des XiL-Ansatzes dargestellt. Der Vorteil der modular aufgebauten Prüfstände bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Reibbelagskörper in verschiedenen Entwicklungsstadien in den einzelnen Prüfkategorien untersuchen zu können. So können beispielsweise am Bauteilprüfstand der Prüfkategorie IV und V mit geeigneten Probekörperaufnahmen Reibbelagsproben und Reibbelagsringe untersucht werden. Eine genauere Darstellung und Erläuterung der Probenkörper wird in Kapitel 4.4 gegeben.

<p>Prüfkategorie I: Betriebsversuch Betriebssystem Fahrzeug</p>	
<p>Prüfkategorie II: Prüfstandsversuch Rollenprüfstand</p>	
<p>Prüfkategorie III: Aggregat-Versuch Systemprüfstand (ABP)</p>	
<p>Prüfkategorie IV: Bauteil-Versuch Bauteilprüfstand (TRP)</p>	
<p>Prüfkategorie V: Probekörper-Versuch Modellprüfstand (TRM)</p>	

Abbildung 2.4: Prüfkategorien am IPEK - KIT

Die im Rahmen dieser Arbeit geeigneten Untersuchungen wurden in Prüfkategorie V am sogenannten Trockenreibmodellprüfstand (TRM) durchgeführt. Dieser wird in Kapitel 4.3.1 näher vorgestellt.

2.2 Tribologie

2.2.1 Allgemeine Definition

Das Wort Tribologie kommt aus dem griechischen und ist zusammengesetzt aus "tribein -reiben" und „logos – Lehre“. Nach der Definition der „Gesellschaft für Tribologie“ ist die Tribologie³⁸:

„... die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung, und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein.“

Nach CICHOSZ kann Tribologie aus ingenieurwissenschaftlicher Betrachtungsweise, hinsichtlich der zentralen Bedeutung ihrer Funktion, auch wie folgt definiert werden³⁹:

„Die Tribologie ist ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste.“

Die Aufgaben der Tribologie sind somit die Untersuchungen von Reibung, Schmierung und Verschleiß, Optimierung der Gleitpartner und der Reibungsvorgänge. Die Ziele der Tribologie sind die funktionelle, ökonomische und ökologische Optimierung von Bewegungssystemen, um den Materialverlust durch Verschleiß so gering wie möglich zu halten⁴⁰.

Allgemein ist anzumerken, dass es sich bei Reibung und Verschleiß nicht um Materialeigenschaften handelt, sondern um Systemeigenschaften oder Systemgrößen, die durch WFPs beeinflusst werden können. Nach CICHOSZ ist dies dadurch begründet, dass es sich nicht um einfache Werkstoffkennwerte, wie Härte oder Elastizitätsmodul, handelt. Vielmehr ist es so, dass Reibung und Verschleiß eine Analyse und Berücksichtigung vielfältiger Parameter und Einflussgrößen des betreffenden tribologischen Systems erfordern.

Folgen und Veränderungen durch Reibung und Verschleiß sind vielseitig. So kann man sie beispielsweise durch Geometrieänderungen, Geräusche oder durch Verschleißpartikel nachweisen. Die Folge dieser Effekte ist zunächst eine fortschreitende Verschlechterung der Systemeigenschaften, die langfristig zum Verlust der Funktionsfähigkeit des Systems führt. Die Verwendung tribologischen

³⁸ (GFT, 2011)

³⁹ (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁴⁰ („Gesellschaft für Tribologie“, 2011)

Wissens bezeichnet man als "Tribotechnik". Übergreifend können durch die Verwendung des gewonnenen Wissens eine ganze Reihe positiver Effekte vermerkt werden: Senkung der Betriebskosten, erhöhte Anlagen- und Maschinensicherheit, Reduzierung von Energie- und Rohstoffressourcen, Verbesserung des Arbeitsschutzes und Vermeidung von Umweltschäden durch Minderung von Emissionen.

Tribologische Forschung, sogenannte "Triboforschung", befasst sich mit der wissenschaftlichen Untersuchung tribologischer Vorgänge und Gesetzmäßigkeiten. Dabei wird zwischen qualitativer und quantitativer Forschung unterschieden. Qualitative Forschung beschäftigt sich mit der Untersuchung tribologischer Zusammenhänge. Dies beinhaltet Art, Form und Ursache der tribologischen Beanspruchung. Erforscht werden dabei Vorgänge, Zustände, Auswirkungen und die den Erscheinungen zugrundeliegenden Mechanismen. Quantitative Forschung beinhaltet die messtechnische Bestimmung der Tribologie. Dabei sind charakteristische Größen, gegenseitige Abhängigkeiten und bestehende Gesetzmäßigkeiten Gegenstand der Untersuchung⁴¹.

2.2.2 Tribotechnisches System

Funktionen, die definitionsgemäß mit Kontaktvorgängen und aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung und daher mit tribologischen Prozessen verbunden sind, heißen tribotechnische Systeme, oder kurz Tribosysteme⁴².

*"Das tribologische System beinhaltet alle an einer tribologischen Beanspruchung beteiligten stofflichen Komponenten und ihre Eigenschaften mit den sich bei ihnen ergebenden Veränderungen sowie die für die Beanspruchung charakteristischen Vorgänge und Größen."*⁴³

Tribotechnische Systeme können durch eine systemtechnische Darstellung abgebildet werden. Hierbei werden Eingangsgrößen der Übergruppen „Energie“, „Stoff“ und „Information“ in technisch nutzbare Ausgangsgrößen umgewandelt.

In Abhängigkeit des Beanspruchungskollektivs⁴⁴, wie

- Bewegungsart und zeitlicher Bewegungsablauf
- Belastung

⁴¹ (GFT, 2011)

⁴² (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁴³ (GFT, 2011)

⁴⁴ (SANTNER, 2004)

- Geschwindigkeit
- Temperaturen

entstehen aber auch durch Reibung und Verschleiß verursachte Energie-, Informations- und Stoffverluste. Das Beanspruchungskollektiv führt zu funktionsrelevanten und systembedingten tribologischen Beanspruchungen der Elemente an deren Wirkflächenpaare und in deren Leitstützstrukturen, wodurch diese tribologischen Prozessen ausgesetzt sind. Reibung und Verschleiß sind Systemeigenschaften⁴⁵, die nach ALBERS und MATTHIESEN⁴⁶ auf systembedingten Wechselwirkungen zwischen den interagierenden Wirkflächen (WF) basieren und keinen reinen geometrie- oder stoffspezifischen Abhängigkeiten unterliegen.

Prinzipiell lässt sich ein tribotechnisches System immer aus vier Grundsystemelementen zusammensetzen: Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedium⁴⁷.

2.2.3 Tribologische Beanspruchung

Die Beanspruchung tribologischer Systeme, sogenannte tribologische Beanspruchung, findet in jedem tribologischen System statt. Dabei beschreibt das GFT-ARBEITSBLATT 7⁴⁸:

"Die tribologische Beanspruchung ist durch Relativbewegung und Wechselwirkungen zwischen Oberflächen unter Einfluss von Kräften gekennzeichnet."

Weiter ist bei tribologischer Beanspruchung wichtig die Summe aller von außen einwirkenden Beanspruchungsgrößen auf das Gesamtsystem zu beachten, die jedoch nach ZUM GAHR nur auf die Grenzschicht des Werkstoffes eine direkte Auswirkung hat⁴⁹. SOMMER erweitert diese Aussage, indem er die Vorgänge in der Grenzschicht als "komplexe und irreversible Prozesse, die über die Kontaktfläche durch Normal- und Tangentialkräfte wirken", beschreibt⁵⁰.

CZICHOS beschreibt tribologische Beanspruchung als "duale Natur", da sie zum einen für die Funktionserfüllung notwendig ist, also die Umwandlung von Energie, Stoff und Informationen in den Wirkorten. Zum anderen ist dies immer mit Reibung und daraus

⁴⁵ (GFT, 2011); (DETERS, 2008)

⁴⁶ (MATTHIESEN, 2002)

⁴⁷ (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁴⁸ (GFT, 2002)

⁴⁹ (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR METALLKUNDE. & ZUM GAHR, 1983)

⁵⁰ (SOMMER u. a., 2010)

resultierendem Verschleiß verbunden. Bei der Untersuchung tribologischer Beanspruchungen ist es in jedem Fall notwendig, die Struktur der technischen Oberfläche, Kontaktvorgänge und Verhältnisse in den Kontaktgrenzflächen zu betrachten. Die Art der Fertigung hat dabei einen ausschlaggebenden Einfluss auf die Struktur der Oberfläche, da sie zu unterschiedlichen Verfestigungen, dem Aufbau von Eigenspannungen und einer Ausbildung von Texturinhomogenitäten zwischen Randzone und Werkstoffinnerem führen kann. Kontaktvorgänge sind nach CZICHOS das zentrale Kennzeichen tribologischer Beanspruchungen. Die Analyse dieser Vorgänge unterscheidet dabei zwischen atomaren und molekularen (Adhäsion und Physi- bzw Chemisorption) und mechanischen Wechselwirkungen, wie Kontaktdeformation, Übertragung von Kräften, Drehmomenten und mechanischer Energie. Diese stellen Kontaktvorgänge dar und sind Hauptmerkmale tribologischer Beanspruchung⁵¹.

Ein weiteres Feld tribologischer Beanspruchung ist nach ZUM GAHR die energetische Betrachtung des tribologischen Systems. Hierbei kann sehr einfach erklärt werden, dass die aus der Beanspruchung resultierende Reibungsarbeit eine Verlustenergie des Systems ist. Diese Verlustenergie kann in ihre Anteile aufgespalten werden, die im Wesentlichen aus der Verformungsenergie, der Bruchenergie, welche beispielweise durch das Loslösen von Verschleißpartikeln entsteht, und der an die Umwelt abgegebenen Wärmeenergie zusammengesetzt ist. Ein weiterer Bestandteil ist die Schallenergie, die frei wird⁵².

2.2.4 Technische Oberflächen

Technische Oberflächen sind die Wirkflächen technischer Bauteile. Eine technische Oberfläche besteht aus einer Vielzahl von dünnen Schichten, die über dem eigentlichen Grundwerkstoff liegen (siehe Abbildung 2.5). Diese lassen sich zusammenfassen zu einer sehr kleinen äußeren Grenzschicht mit wenigen Nanometern, bestehend aus Verunreinigungen, einer Adsorptionsschicht und Oxidschicht und einer inneren Grenzschicht, bestehend aus einer verformten Schicht und dem eigentlichen Grundwerkstoff.

⁵¹ (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁵² (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR METALLKUNDE. & ZUM GAHR, 1983)

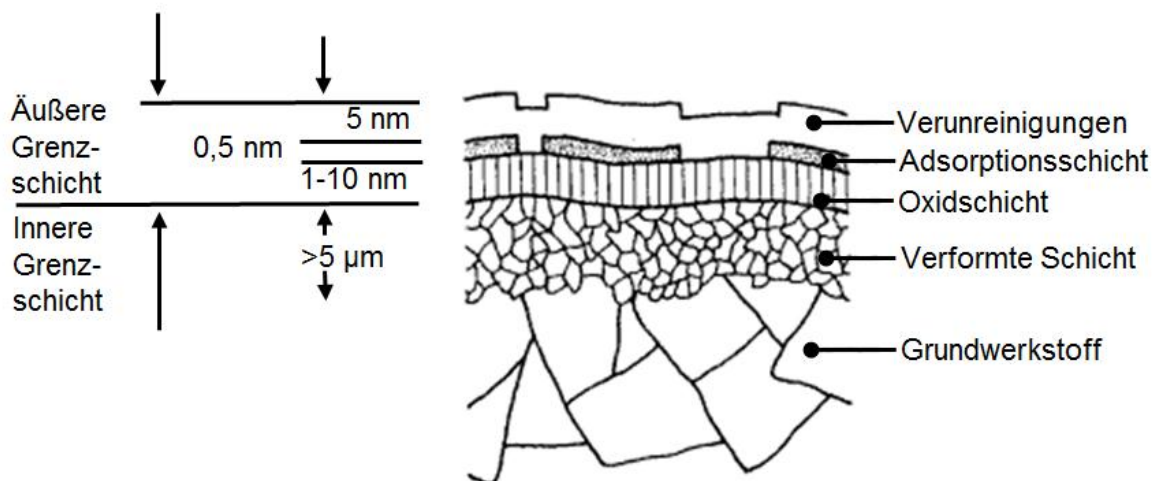


Abbildung 2.5: Aufbau technischer Oberflächen: Schematische Darstellung des Querschnitts einer Metall Oberfläche⁵³

Diese Oberflächenschichten weisen unterschiedliche chemische Zusammensetzungen auf. Bei dem ausgebildeten Gefüge und der Härte bestehen Unterschiede zwischen dem Grundwerkstoff und den Grenzschichtbereichen⁵⁴.

Durch die Beanspruchung des Kontaktbereiches bildet sich diese Oberflächenschicht aus. Durch die oszillierende Temperaturbelastung und der mechanischen Beanspruchung tritt eine tribochemische Reaktion auf, die eine verschleißfeste, fest haftende Reaktionsschicht bildet, bei der die Rauheitsspitzen im Kontakt eingeebnet werden. Durch die weitere mechanische Beanspruchung werden diese reaktionshemmenden Deckschichten entfernt und durch die Temperaturerhöhung und der umgebenden Atmosphäre werden wieder neue Reaktionsschichten gebildet, die weitere Adhäsionsvorgänge behindern. Bei Metallen wird durch die Reibungshitze und Sauerstoff die oberste Schicht in eine Oxidschicht umgewandelt. In Abbildung 2.6 ist die Bildung einer Oberflächenschicht skizziert.



Abbildung 2.6: Bildung einer Oberflächenschicht nach STACHOWIAK⁵⁵

⁵³ (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁵⁴ (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁵⁵ (STACHOWIAK & BATCHELOR, 2005)

Eine Beurteilung der Charakteristiken von technischen Oberflächen erfordert ihre Vermessung, durch berührende (Tastschnitt) oder berührungslose (optisch) Verfahren.

Zum Vergleich verschiedener Oberflächen wurden Parameter eingeführt, auf die im Folgenden kurz eingegangen werden sollen. In der technischen Praxis sind der arithmetische Mittenrauwert R_a und die gemittelte Rauhtiefe R_z die am häufigsten verwendeten Rauheitskenngrößen.

Der arithmetische Mittenrauwert R_a ist gleichbedeutend mit der Höhe eines Rechtecks, dessen Länge gleich der Messstrecke und dessen Fläche gleich der Summe der zwischen Rauheitsprofil und Abszisse eingeschlossenen Flächen ist.

Bei der gemittelten Rautiefe R_z wird das gemessene Profil in fünf gleiche Abschnitte aufgeteilt. Für jeden dieser Bereiche wird eine Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Ordinatenwert gebildet. Der Mittelwert dieser fünf Differenzen ergibt die gemittelte Rautiefe⁵⁶.

Die aus technischer Sicht relevanten Eigenschaften von Wirkflächen werden mit den Rauheitsparametern alleine nur unzureichend wiedergegeben. Ein weiterer Kennwert zur Charakterisierung von Wirkflächen ist der Materialtraganteil. Der Materialanteil M_t ist der Anteil der Auflagefläche (bestimmte Schnittlinie) zu der betrachteten Gesamtfläche (Bezugsstrecke) in %⁵⁷. Die Profiltraganteilkurve (Abbott'sche Tragkurve) ist die graphische Darstellung der Beziehung zwischen den Werten des Verhältnisses der tragenden Profillänge und der Horizontalebene des Profilschnittes.

Somit kann man unterscheiden zwischen der geometrisch idealen Kontaktfläche, bestehend aus den aufeinanderliegenden WF und der geometrisch realen Kontaktfläche, zusammengesetzt aus den Funktionskontakten (siehe Abbildung 2.7).

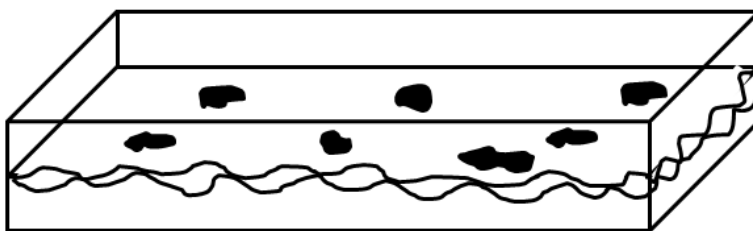


Abbildung 2.7: Geometrische Kontaktfläche (ganze Fläche zwischen beiden Körpern) und reale Kontaktfläche (nur die schwarz gekennzeichneten Auflageflächen)

⁵⁶ DIN EN ISO 4287:1998

⁵⁷ (früher: Traganteil t_p)

2.3 Reibung

2.3.1 Grundlagen und Übersicht

Reibung ist ein Phänomen, das überall in der Natur und Technik auftritt, auch wenn es oft nicht bewusst wahrgenommen wird. Man nutzt ihre Effekte beispielsweise beim Spielen eines Streichinstrumentes, Zusammenhalten von Stoffen durch Fäden oder der Fortbewegung eines Fußgängers. Reibung ist der Widerstand entgegen einer ausgeführten Bewegung, der durch die Energiedissipation, bzw der Reibarbeit, messbar gemacht werden kann. Der größte Teil dieser irreversibel dissipierten Energie wird in Wärme gewandelt.⁵⁸

Die Reibung eines tribologischen Systems wird durch Reibungszustand, -mechanismus und -art beschrieben⁵⁹. Wenn zwischen zwei relativ zueinander bewegten Wirkflächen eine Kraft übertragen wird, wie z.B. einem tribotechnischem System, kann von Reibung gesprochen werden. Beispielsweise bei Schraubverbindungen, dem Rollen eines Fahrzeugreifens oder dem Einsatz von Reibkupplungen oder Bremsen. Reibung zwischen Festkörpern kann nach SOMMER in Abhängigkeit des Bewegungszustandes in statische und dynamische Reibung eingeteilt werden⁶⁰.

Die Reibung ist ein komplexer Vorgang, der gemäß einer Energiebilanz in die folgenden Phasen eingeteilt werden kann⁶¹.

- Energieeinleitung (z.B. Berührung technischer Oberflächen, Bildung der wahren Kontaktfläche)
- Energieumsetzung (z.B. Deformations- und Furchungsprozesse)
- Energiedissipation (z.B. Wärmeerzeugung, Mikrobruchvorgänge und Schall-emission)

Das Gesetz der trockenen Reibung lässt sich auf den französischen Ingenieur Charles Augustin Coulomb zurückführen, der Vorgängerarbeiten unter anderem von Amontons und Euler zum Coulomb'schen Reibungsgesetz ausbaute⁶².

Ein qualitativer Vergleich der Umwandlungsprodukte aus Reibungsenergie beim Reiben gibt HISHAM⁶³. 80-90% der Reibungsenergie, die beim Reiben zweier

⁵⁸ Deters, 2008

⁵⁹ (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁶⁰ (SOMMER u. a., 2010)

⁶¹ (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁶² (POPOV, 2009)

⁶³ (HISHAM A, 2003)

Wirkflächen entsteht, wird dabei in Wärme umgewandelt, der restliche Betrag in andere Nebenprodukte, wie in Abbildung 2.8 zu sehen ist.

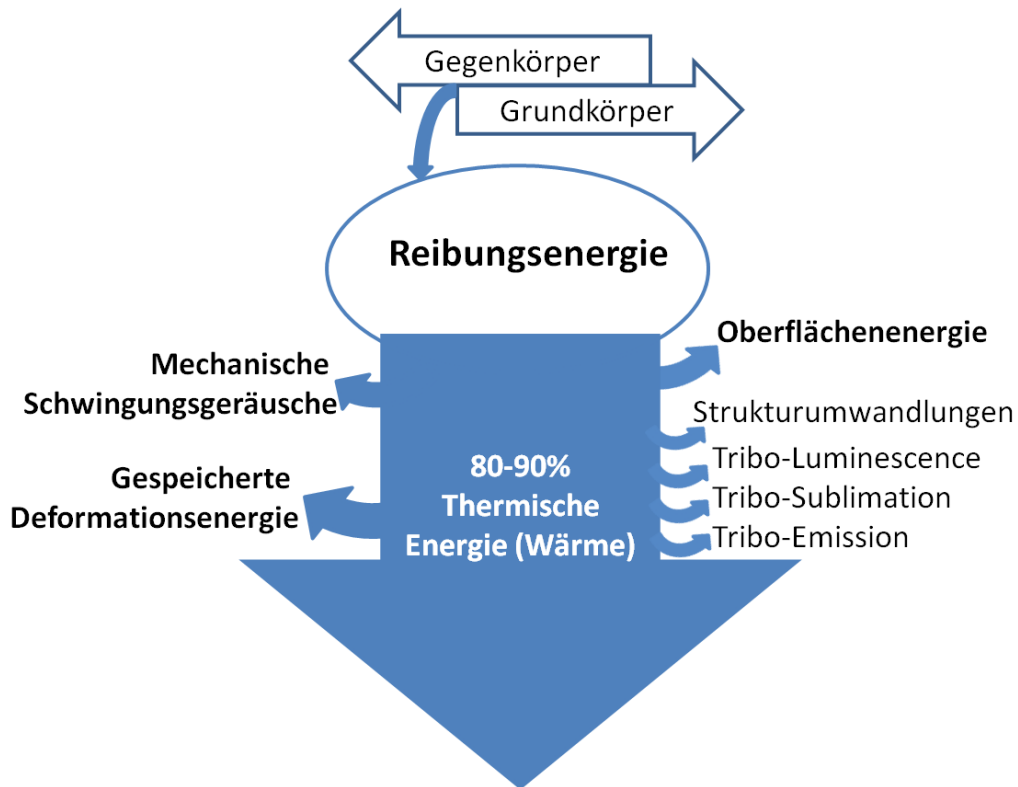


Abbildung 2.8: Qualitativer Vergleich zwischen den Energieerzeugnissen beim Reibprozess während der Reibung dargestellt durch die Dicke der abgehenden Pfeile von der Reibungsenergie⁶⁴.

2.3.2 Reibungsmessgrößen

Wie im Kapitel zuvor beschrieben, kann allgemein gesagt werden, dass die Reibung eine Wechselwirkung von aufeinanderliegenden Wirkflächen ist. Die Reibmessgrößen, welche im Wesentlichen in kräftemäßige und energetische Messgrößen unterteilt werden können, beschreiben demnach nicht einen einzelnen Körper, sondern vielmehr das Wirkflächenpaar mit vorliegenden Belastungskollektiv innerhalb des tribotechnischen Systems.

Kräftemäßig und energetisch wird die Reibung differenziert in⁶⁵:

- Reibungskraft F_R

Die Reibungskraft F_R wird als Kraft definiert, welche infolge der Reibung zwischen zwei oder mehrere sich relativ zueinander bewogender (translatorisch), berührender Wirkflächen als mechanischer Widerstand auftritt. Sie ist parallel

⁶⁴ Bild-Quelle: (HISHAM A, 2003)

⁶⁵ (GfT, 2002)

zur Kontaktfläche der Körper gerichtet. F_N ist dabei die Normalkraft die auf den Reibkontakt wirkt.

$$F_R = F_N \cdot \mu \quad 2.1$$

Dies ist eine vereinfachte Darstellung und hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Reibungszahl von einer Vielzahl von Faktoren, wie beispielsweise der Gleitgeschwindigkeit, Systemtemperatur, Luftfeuchtigkeit, Schaltzeit oder Flächenpressung abhängig ist⁶⁶.

- Reibmoment M_R

Der Widerstand gegen rotatorische Relativbewegungen, der sich aufgrund von Reibvorgängen einstellt, wird als Reibmoment M_R bezeichnet. Der Faktor r bezeichnet hierbei den Abstand zwischen Drehpunkt und Wirkungslinie der Reibungskraft.

$$M_R = F_R \cdot r \quad 2.2$$

- Reibungszahl μ

Die Reibungszahl μ oder auch Reibkoeffizient genannt ist der dimensionslose Quotient aus der Reibungskraft F_R und der Normalkraft F_N , welche senkrecht zur Kontaktfläche steht.

$$\mu(t) = \frac{F_R}{F_N} \quad 2.3$$

- Reibungsarbeit W_R (Gleiten, Rollen, Bohren)

Die zur Aufrechterhaltung eines Bewegungsvorgangs unter Reibung zu verrichtende Arbeit wird als Reibungsarbeit W_R bezeichnet.

$$W_R = \mu \cdot F_N \cdot s \quad 2.4$$

- Reibungsleistung P_R

Die Reibleistung P_R definiert sich als Momentanleistung bzw. als mittlere Leistung:

$$P_R = \frac{W_R}{t} = F_R \cdot v_{rel} = M_R \cdot \omega_{rel} \quad 2.5$$

Sie gibt die aufgebrachte Reibungsarbeit pro Zeiteinheit an.

⁶⁶ (KRAGELSKI, 1971)

- Reibungswinkel ρ

Der Reibungswinkel ist der Winkel unter dem ein auf einer schiefen Ebene liegender Körper zu rutschen beginnt. Die dabei auf den Körper wirkenden Kräfte sind in Abbildung 2.9 gezeigt. Der Tangens des Reibungswinkels entspricht dem statischen Reibungskoeffizient.⁶⁷

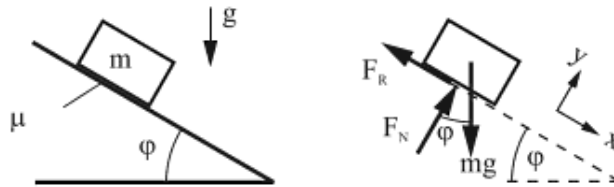


Abbildung 2.9: Reibungswinkel ρ in Abhängigkeit der einwirkenden Kräfte⁶⁸

2.3.3 Reibungsmechanismen

Das GFT ARBEITSBLATT 7 definiert Reibungsmechanismen wie folgt:

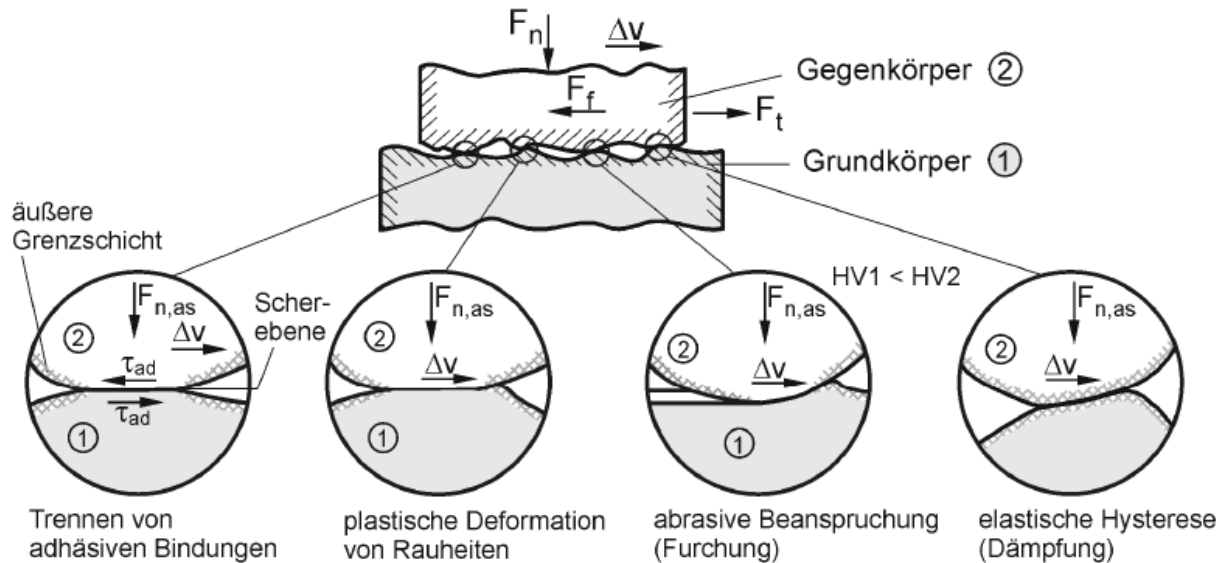
„Als Reibungsmechanismen werden die im Kontaktbereich eines tribologischen Systems auftretenden bewegungshemmenden, energiedissipierenden Elementarprozess der Reibung bezeichnet“⁶⁹

Die Reibungsmechanismen gehen von örtlich und zeitlich stochastisch verteilten Mikrokontakten im Kontaktbereich aus. Nach den Ergebnissen der Kontaktmechanik nimmt bei Wirkflächenpaaren die Anzahl der Mikrokontakte etwa linear mit der Normalkraft F_N zu. Geht man davon aus, dass jeder Mikrokontakt einen elementaren Bewegungswiderstand darstellt, so ergibt sich für die mikroskopische Reibungskraft F_R etwa der Anzahl der Mikrokontakte und ist proportional zur Normalkraft F_N . Eine Zusammenfassung der Reibungsmechanismen gibt Abbildung 2.10.

⁶⁷ Für eine detaillierte Betrachtung: (POPOV, 2009)

⁶⁸ (POPOV, 2009)

⁶⁹ (GFT, 2002)

Abbildung 2.10: Reibungsmechanismen⁷⁰

Im Einzelnen treten dabei auf:

Adhäsion und Scheren

Adhäsion beruht auf chemischen Bindungen, die bei der Berührung von Oberflächen durch molekulare Wechselwirkungen in der Kontaktfrequenzfläche auftreten. Der Mechanismus besteht darin, dass bei einer tribologischen Beanspruchung infolge hoher lokaler Pressung an einzelnen Oberflächenrauigkeitshügeln, also bei dem in Abbildung 2.10 eingekreisten Bereich, schützende Oberflächendeckschichten durchbrochen werden und lokale Grenzflächenbindungen entstehen. Diese Grenzflächenbindungen, die im Falle metallischer Kontaktpartner auch als Kaltverschweißung bezeichnet werden, können eine höhere Festigkeit besitzen, als in der ursprünglichen Kontakt-Grenzfläche.

Plastische Deformation

Die plastische Deformation ist ein mechanisch bedingter Reibmechanismus. Sie beruht auf der Verdrängung von Profilüberschneidungen (Mikroerhebungen). Beim Kontakt und der tangentialen Relativbewegung sich berührender Körper kommt es immer unter anderem zu plastischer Kontaktdeformation, die Energieverluste durch dissipative Prozesse zur Folge haben.

⁷⁰ (DETERS, 2008)

Furchung oder Abrasion

Die Furchung ist insbesondere dann maßgeblich an der Energieumsetzung beteiligt, wenn die Elemente der Systemstruktur einen merklichen Härteunterschied aufweisen. Bei der Furchung oder Abrasion dringt die härtere Wirkfläche in die weichere Wirkfläche ein und furcht diese aufgrund der Relativbewegung. Der harte Körper kann hierbei ein mineralisches Teilchen, eine Mikrorauheit des Gegenkörpers oder ein breites abgetragenes Verschleißteilchen sein.

Elastische Hysterese

Die elastische Hysterese beruht auf der inneren Reibung durch die Deformation der Randzonen der Kontaktflächen

2.3.4 Reibungsarten

Grundsätzlich kann man die Reibungsarten in Festkörperreibung und Bewegungsreibung unterteilen.

Festkörperreibung umfasst nach POPOV⁷¹:

„...elastische und plastische Deformation von Oberflächenbereichen der kontaktierenden Körper, Wechselwirkungen mit einer Zwischenschicht, Mikrobrüche und die Wiederherstellung der Kontinuität des Materials, Anregungen von Elektronen und Photonen, chemische Reaktionen und Übertragung von einem Teilchen zum anderen“.

Anders ist es dabei bei der dynamischen Reibung, auch Bewegungsreibung genannt, wo es durch die Bewegung zu Verlusten kommt, sowohl durch Verschleiß als auch durch Energieverlust.

Bewegungsreibung erklärt SOMMER als⁷²:

"...zwischen relativ zueinander bewegten Körpern auftretende Reibungskräfte, die der Bewegungsrichtung entgegen wirken und versuchen, die Bewegung zu hemmen."

Nach kinematischen Gesichtspunkten kann Bewegungsreibung weiter unterteilt werden in Gleitreibung, Bohrreibung, Rollreibung, Wälzreibung und Stoßreibung.

Die Größe der einzelnen Reibungsarten – gekennzeichnet z.B. durch die Reibungszahl μ – wird in charakteristischer Form durch den Reibungszustand

⁷¹ (POPOV, 2009)

⁷² (SOMMER u. a., 2010)

beeinflusst. Für den Reibungszustand maßgeblich ist der Aggregatzustand im Kontaktbereich und ob dieser Reibungszustand ohne Verwendung eines Zwischenmediums (Festkörperreibung) oder mit einem Zwischenmedium (Flüssigkeitsreibung, Gasreibung) erzielt wird.

Die im Rahmen dieser Arbeit behandelte Reibungsart ist die Gleitreibung mit ihrem Reibungszustand Festkörperreibung. Damit einher gehen recht hohe Reibungszahlen von 0,1 bis >1 ⁷³.

Bei der Gleitreibung treten, verglichen mit anderen Reibungsarten, die größten tribologischen Beanspruchungen im Kontaktgrenzbereich auf. Dies bezieht sich sowohl auf thermische Vorgänge als auch auf einen möglichen Verschleiß.

In physikalischer Hinsicht kommt die Festkörpergleitreibung im Allgemeinen durch die Überlagerung mehrerer Reibungsmechanismen zustande. Die Bestimmung von Reibungszahlen in einem rechnerischen Anwendungsfall kann somit nur durch experimentelle Messung unter Berücksichtigung der verschiedenen Systemparameter des konkreten Anwendungsfalls vorgenommen werden.

Um die charakteristischen Zusammenhänge in Abbildung 2.7 detaillierter beschreiben zu können, wird die schematische Darstellung mit Hilfe des C&C²-Ansatzes in Abbildung 2.11 dargestellt.

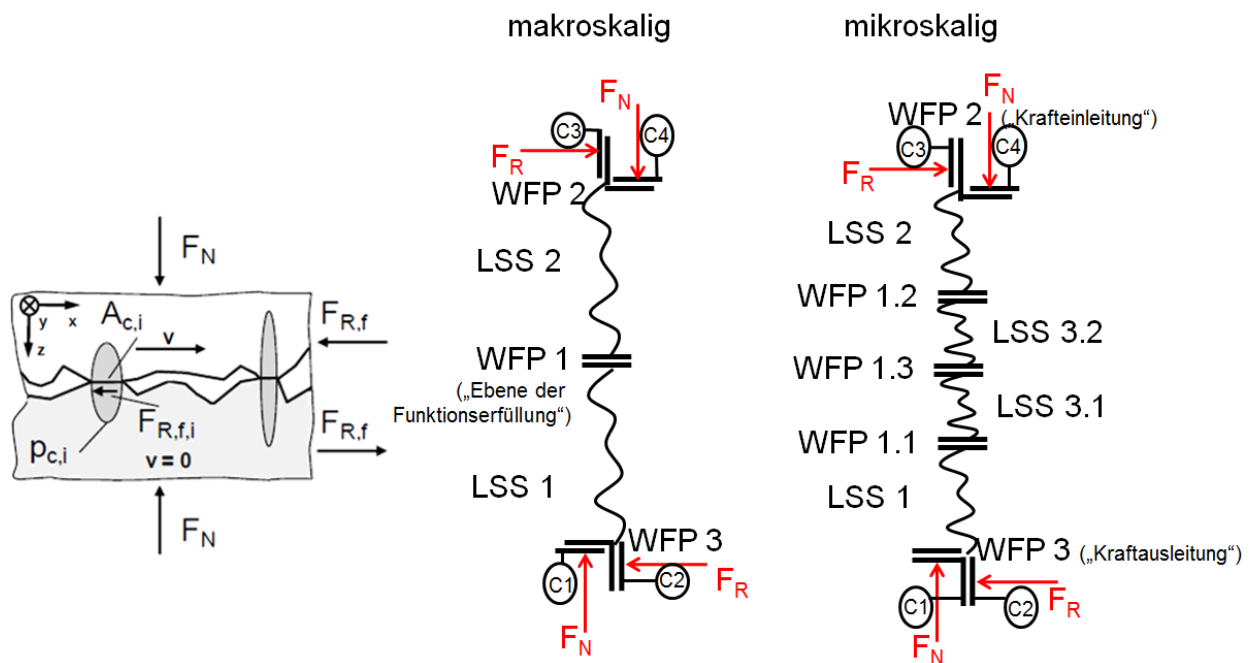


Abbildung 2.11: Makro-/Mikromodellvorstellung der Festkörperreibung auf Basis von C&C²-Analyse⁷⁴

⁷³ (HIERSIG, 1997)

Makroskopisch entsteht Festkörperreibung durch den Funktionskontakt der beiden Wirkflächen (WF1.1 und WF 1.2 in WFP 1) der Tragstrukturen TS der Grundkörper. Mikroskopisch betrachtet haben die Wirkflächen aufgrund der Oberflächenrauheiten mehrere Funktionskontakte. Diese Funktionskontakte sind verantwortlich für die lokalen Mechanismen, die durch Superposition die Höhe der Festkörperreibungszahl bestimmen. Es bildet sich jeweils eine zusätzliche Grenzschicht⁷⁵ aus (LSS 3.2 und LSS 3.1 mit den jeweiligen WFPen)

Die heutigen Betrachtungsmodelle gründen alle auf der Vorstellung, dass in den jeweiligen mikroskaligen Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen Energie umgesetzt wird. Die energetische Betrachtungsweise geht auf Fleischer⁷⁶ zurück. Adhäsions- und Deformationsprozesse an den Mikrokontakten, beeinflusst durch die Grenz- und Reaktionsschichten, bilden die Grundelemente der Festkörperreibung.

2.4 Verschleiß

2.4.1 Grundlagen und Übersicht

Verschleiß ist eine durch Reibung hervorgerufene Abmessungs- bzw. Formänderung der Reibpartner und führt somit zu einer Veränderung des strukturellen Aufbaus eines Tribosystems⁷⁷.

Dieser Vorgang der Oberflächenveränderung und -abtragung ist in der Technik meist unerwünscht. Dies ist dadurch zu begründen, dass es sich hierbei um eine der Hauptursachen für Bauteilschädigungen handelt, welche zwangsläufig zu einem Verlust der Funktionsfähigkeit des Systems führt⁷⁸. Es existieren jedoch auch verschiedene Bereiche, bei denen auf Grundlage von Verschleiß technologische Prozesse ablaufen. Beispiele hierfür sind Schleifen, Polieren oder Sandstrahlen. Verschleiß kann in Abhängigkeit einer Vielzahl an Einflussgrößen auftreten.⁷⁹

- Bewegungsform
- zeitlicher Bewegungsablauf
- Beanspruchung

⁷⁴ (BEHRENDT, 2009)

⁷⁵ siehe dazu auch Abbildung 2.5

⁷⁶ (FLEISCHER, 1976)

⁷⁷ (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR METALLKUNDE. & ZUM GAHR, 1983)

⁷⁸ (POPOV, 2009)

⁷⁹ (GfT, 2002)

- Aufbau der Systemstruktur
- Beanspruchungsparameter

Man unterscheidet dabei Einflussgrößen aus der Struktur und die aus dem Beanspruchungskollektiv. Strukturabhängige Parameter sind nach SOMMER unter anderem Gestalt, jeweilige Härte der Reibpartner und Aggregatzustand von Umgebungsmedium und Zwischenstoff. Das Beanspruchungskollektiv wird beeinflusst durch Belastung, Bewegung und Temperatur⁸⁰.

2.4.2 Verschleißmessgrößen

Durch die Änderung der Gestalt, der Masse und der Oberfläche eines Körpers, sowie durch die Charakterisierung der Art und Form anfallender Verschleißpartikel, lässt sich Verschleiß in so genannten Maßzahlen als Verschleißmessgrößen quantitativ bestimmen⁸¹.

Mögliche „direkte“ messtechnische Dimensionen sind Längen, Flächen und Volumina. Verschleißgeschwindigkeit, Verschleiß-Weg-Verhältnis und Verschleiß-Durchsatz-Verhältnis werden hingegen „indirekte“ Verschleißmessgrößen genannt, da der Verschleiß hier in Bezug auf eine andere Messgröße angegeben wird. Bei der Betrachtung von bezogenen oder indirekten Verschleißmessgrößen, also diejenigen nicht unmittelbar gemessen werden können, sondern durch Rechenverfahren ermittelt werden müssen, sollten diese bei tribologischen Prüfungen nur bedingt eingesetzt werden.⁸² Oft täuschen sie nur scheinbar untereinander vergleichbar oder besser verständliche Ergebnisse vor. So nimmt beispielsweise der Betrag der Fehlerfortpflanzung bei einer steigenden Anzahl von Faktoren eine immer größere Rolle ein, was bei der Berechnung der Messgrößen berücksichtigt werden muss.

Eine Verschleißmessgröße bezieht sich stets auf die Materialpaarung. Es ist strikt zwischen dem Komponentenverschleiß, d.h. einzelnen Verschleißmessgrößen von Grund- und Gegenkörper und dem Systemverschleiß, d.h. der Summe der Verschleißmessgrößen von Grund und Gegenkörper, zu differenzieren.

⁸⁰ (SOMMER u. a., 2010)

⁸¹ (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁸² (GfT, 2002)

2.4.3 Verschleißmechanismen

Tribologische Verschleißmechanismen sind grundlegend in die vier Gruppen Oberflächenzerrüttung, Abrasion, Adhäsion und Tribochemische Reaktion zu unterteilen⁸³. Die Aufteilung kommt dabei durch die Reibprozesse, durch die sie entstehen, zustande. Wobei der Verschleißmechanismus die im System ablaufenden physikalischen und chemischen Wechselwirkungen beschreibt.

Es ist ein einzelnes, aufeinanderfolgendes und überlappendes Auftreten der Verschleißmechanismen möglich. Dieser Vorgang wird von CZICHOS auch als Materialdissipation bezeichnet. Die genannten Verschleißmechanismen sind in Abbildung 2.12 schematisch dargestellt und werden im Folgenden intensiver behandelt⁸⁴.

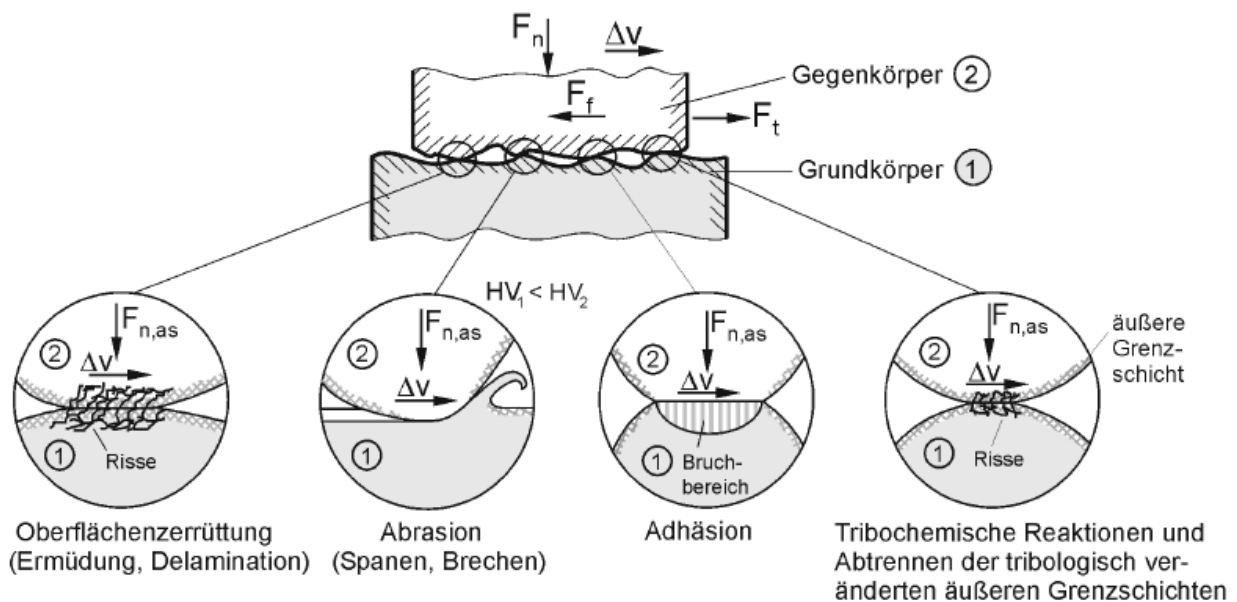


Abbildung 2.12: Illustration der grundlegenden Verschleißmechanismen⁸⁵

Oberflächenzerrüttung

Hauptmerkmale der Oberflächenzerrüttung sind Rissbildung, Risswachstum und letztendlich Abtrennung von Verschleißpartikeln. Letzteres basiert auf wechselnden Beanspruchungen der Grund- und Gegenkörper in oberflächennahen Bereichen⁸⁶. Rauheitshügel des harten Gegenkörpers und Partikel im Zwischenstoff weisen

⁸³ (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁸⁴ (GROTE & FELDHUSEN, 2007)

⁸⁵ Deters 2008

⁸⁶ (SANTNER, 2004)

jeweils eine große Härte auf. In der direkten Folge führt dies zu Ritzungen und Mikrozerspannungen des Grundkörpers⁸⁷.

Abrasion

Abrasion entsteht nach der Definition von SOMMER⁸⁸ durch:

"Rauheitsspitzen harter Festkörper, harte Abrasivstoffe oder auch abgetrennte verfestigte Verschleißpartikel, welche unter Last in weichere Festkörper eindringen und über deren Oberflächen gleiten".

Charakteristische Merkmale der Abrasion sind Riefen bzw. Furchen und Mikrozerspannung.

Adhäsion

Adhäsion ist nach dem GFT ARBEITSBLATT 7⁸⁹:

"...Ausbildung von Grenzflächen-Haftverbindungen, wobei Verschleiß durch nachfolgende Trennung der Haftverbindung außerhalb der ursprünglichen Grenzflächen auftritt."

Die auftretenden Grenzflächenverbindungen werden bei metallischen Kontaktpartnern auch als "Kaltverschweißungen" bezeichnet.

Im ersten Schritt werden bei der Adhäsion atomare Bindungen, sogenannte Mikroverschweißungen, an den plastisch deformierten Mikrokontakten der abgetrennten Deckschicht zwischen Grund- und Gegenkörper gebildet. Liegt anschließend eine festere Bindung vor, kann aus dem weicheren Reibpartner Material ausbrechen und dem festeren Reibpartner übertragen werden. Dort kann das Material letztlich verbleiben, abgetrennt oder zurück übertragen werden⁹⁰.

Tribochemische Reaktion

Die Tribochemische Reaktion wird je nach Literatur auch als Tribooxidation⁹¹, Triboreaktion⁹² oder korrosiver Verschleiß⁹³ bezeichnet. Dabei kommt es durch tribologische Beanspruchung zu chemischen Reaktionen zwischen den Elementen des beanspruchten Systems⁹⁴. Bei der tribochemischen Reaktion laufen zwischen

⁸⁷ (SANTNER, 2004)

⁸⁸ (SOMMER u. a., 2010)

⁸⁹ (GFT, 2002)

⁹⁰ (SANTNER, 2004)

⁹¹ (GFT, 2002)

⁹² (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁹³ (POPOV, 2009)

⁹⁴ (GFT, 2002)

Elementen von Grund- und Gegenkörper sowie den Elementen des Umgebungsmediums, z. B. Sauerstoff, chemische Reaktionen ab. Diese chemische Reaktion beruht auf der Tribomutation⁹⁵. Dabei werden die Elementkonzentrationen, die chemischen Bindungen und die Struktur in dünnen nm-Bereichen unter den Oberflächen der Reibpartner verändert. Hervorgerufen werden Tribomutationen möglicherweise durch so genannte "hot spots", die durch den Energieeintrag bei Reibungsvorgängen entstehen. Diese Energieeinträge erfolgen in lokal eng begrenzten Bereichen, die statistisch örtlich und zeitlich verteilt auf den Oberflächen der Tribopartner entstehen und bei denen kurzzeitig Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur auftreten können.

2.4.4 Verschleißarten

Die Verschleißarten lassen sich nach CZICHOS bezüglich ihrem Auftreten in geschlossene und offene Tribosysteme unterteilen. Generell sind an den Verschleißarten die vorher behandelten Verschleißmechanismen in unterschiedlichster Zusammensetzung beteiligt⁹⁶.

Gleitverschleiß, Wälzverschleiß, Stoßverschleiß, Schwingungverschleiß und Furchungverschleiß (Gegenkörperfurchung) liegen hauptsächlich in geschlossenen Tribosystemen vor. Furchungverschleiß (Teilchenfurchung), Strahlverschleiß und Erosion (Strömungverschleiß) kommen hingegen meist in offenen Tribosystemen vor.

Der Gleitverschleiß, ein durch Gleiten zwischen zwei oder mehrerer sich berührender Werkstoffe ablaufender Verschleißprozess, wird wegen seiner Bedeutung für diese Arbeit genauer betrachtet. Es wird in Abhängigkeit eines Zwischenmediums zwischen Misch- oder Grenzreibung, d. h. Festkörper- oder Trocken-Gleitverschleiß unterschieden. Anhand der Optik der Verschleißflächen und entstehenden Partikeln kann auf die wirkenden Verschleißmechanismen geschlossen werden.

Die bei Gleitverschleiß durch das Wirken der einzelnen Verschleißmechanismen entstehenden Verschleißpartikel können vereinfacht in die folgenden Gruppen eingeteilt werden⁹⁷.

- Pulverförmige bzw. amorphe Verschleißpartikel hauptverursacht durch tribochemische Reaktion

⁹⁵ (MACH, 2003)

⁹⁶ (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁹⁷ (POLZER & MEIßNER, 1982)

- Spiral- bzw. spanförmige Verschleißpartikel hauptverursacht durch Abrasion
- Schuppen bzw. lamellenförmige Verschleißteilchen hauptverursacht durch Oberflächenzerrüttung
- Splitterförmige Verschleißpartikel hauptverursacht durch Oberflächenzerrüttung
- Kugelförmige Verschleißpartikel hauptverursacht durch Kontaktdeformation und Triboschmelzen

Während des Furchungverschleißes entstehen durch abrasive Kontakte Riefen oder Furchen. Dabei unterscheidet man nach CZICHOS zwischen Gegenkörperfurchung (Zwei-Körper-Abrasion) und Teilchenfurchung (Drei-Körper-Abrasion), wo durch das eingebettete Teilchen zusätzliche Wirkflächenpaare entstehen und durch diese dann der weichere Körper zerrüht wird⁹⁸.

2.5 Körperschallemissionen

Wie in Abbildung 2.8 beschrieben, geht ein Teil der Reibenergie in mechanische Schwingungen über. Die Schwingungen sind als Körperschall detektierbar. Wegen ihrer substantziellen Bedeutung für das Verständnis dieser Arbeit sollen hier die Grundlagen von Körperschall kurz erläutert werden.

2.5.1 Grundlagen

Der Begriff des Schalls wird meistens im Gebiet der Akustik für das menschliche wahrnehmbare Phänomen verwendet. Demzufolge liegt dort das Hauptaugenmerk auf Luftschall im Hörfrequenzbereich zwischen ca. 16Hz und 16kHz, auf seiner Entstehung und Ausbreitung, sowie auf seiner Beeinflussung zum Zwecke der Optimierung seiner Wirkung auf den Menschen.

In DIN 1320 wird Schall als „*elastodynamische Schwingung und Welle*“, Schallemission als das Aussenden von Schall definiert.⁹⁹ Dieser allgemeinen Definition folgend ist jede analytische Beschäftigung mit diesem Phänomen als Schallemissionsanalyse

⁹⁸ (CZICHOS & HABIG, 2010)

⁹⁹ (DIN1320, 2009)

zu bezeichnen, ohne Einschränkung des Ausbreitungsmediums oder des Frequenzbereiches¹⁰⁰.

Für die technische Zustandsüberwachung aber ist vorrangig, wenn auch nicht ausschließlich, Körperschall von Bedeutung, da Aspekte der Wahrnehmung durch den Menschen in diesem Kontext nicht von Belang sind. Körperschall¹⁰¹ wird definiert als¹⁰²:

„...eine Klasse von Phänomenen, bei denen transiente elastische Wellen durch die rasche Freisetzung von Energie an lokalen Quellen im Material generiert wird“.

Die dabei ausdrücklich erwähnte Transienz beschränkt den Begriff prinzipiell auf Emissionen, die durch Quellmechanismen ebensolchen Charakters verursacht werden, also Prozesse von kurzer Dauer, bei deren messtechnischer Erfassung Signale mit deutlich erkennbarem Beginn und Ende aufgenommen werden (sog. Bursts) Im Gegensatz zur Ultraschallprüfung, bei der Schallwellen aktiv durch Schallgeber erzeugt werden, empfängt die Schallemissionsanalyse ausschließlich die von der Quelle selbst generierten elastischen Wellen. Typische Quellen solcher Emissionen sind Deformation und Bruch im Material. Wobei Bruch und Deformation Folge tribologischer Prozesse sind.¹⁰³

Die Möglichkeiten der Körperschalluntersuchung erstrecken sich von hochfrequenten Ultraschallbereichen bis hin zu Bereichen tiefer Frequenz, in Anwendung seismischer Untersuchungen. Die im Zeitbereich einer Sprungfunktion ähnliche Bewegung hat ein sehr breitbandiges Spektrum, das bis weit in den Ultraschallbereich (mehrere Mhz) reicht.¹⁰⁴

2.5.2 Entstehung und Ausbreitung von Körperschall

Betrachtet man ein tribologisches System, so erkennt man, dass nur ein geringer Anteil der Reibungsenergie bzw. -arbeit in Körperschall umgewandelt und weitergeleitet wird. Der überwiegende Teil wird in Wärme umgewandelt¹⁰⁵. Trifft eine Körperschallwelle auf eine Oberfläche, so kommt es zur Schallabstrahlung. Das heißt, die Welle wird als Schall an die Umgebung abgegeben. Der Mensch kann

¹⁰⁰ Als Ausbreitungsmedium können alle elastischen Medien (Fluide oder Festkörper) dienen. Nach dem jeweiligen Aggregatzustand wird nach Luftschall, Flüssigkeitsschall und Körperschall unterschieden. Vgl. (GROTE & FELDHUSEN, 2007) S. O27

¹⁰¹ Körperschall, im Englischen auch Acoustic Emission, kurz AE

¹⁰² (MEYEN, 1991)

¹⁰³ (HASE u. a., 2009)

¹⁰⁴ (HERING u. a., 2012)

¹⁰⁵ siehe hierzu Abbildung 2.8 in Kapitel 2.3.1

diese Abstrahlung als Luftschall in Form von Geräuschen wahrnehmen. Auch Messungen auf der Bauteiloberfläche sind beispielsweise durch Körperschallsensoren möglich.

Für die Deutung und Auswertung von Körperschall ist das Verständnis der Entstehungs- und Ausbreitungsmechanismen wichtige Voraussetzung, zumal diese erheblich komplexer als bei hörbarem Luftschall sind. Das Hauptaugenmerk wird hier bei der Körperschallentstehung auf Vorgänge gelegt, die die elementare Ursache für Körperschallemissionen darstellen. Nach Sturm¹⁰⁶ und BARANOV¹⁰⁷ können Schallemissionen „intern“ durch Versetzungen, Korngrenzgleiten, Phasenumwandlungen, Riss und Bruch oder „extern“ durch Stoß, Reibung, Korrosion, Kavitation, Verschleiß, Strömung und Bewegung hervorgerufen werden.

Auf atomarer Ebene werden bei Reibung nur dann Gitterschwingungen in Form von Schallwellen angeregt, wenn die durch Berührung mit dem Reibpartner angeschlagenen Atome eine Eigenschwingung des Festkörpers anregen. Ansonsten werden praktisch keine Schallwellen erzeugt¹⁰⁸. Dabei ist zu beachten, dass Festkörper sehr viele Eigenformen aufweisen können. Die Körperschallentstehung kann also häufig auf Mechanismen zurückgeführt werden, die in Zusammenhang mit dem Zustand technischer Systeme stehen, was die Verwendung als Diagnosemerkmal nahelegt.

Die Schallwellenausbreitung in Festkörpern erfolgt nicht nur als Longitudinal- oder Dichte-, sondern auch als Transversal- oder Scherwelle. Dies ist ein signifikanter Unterschied zur Schallausbreitung in flüssigen oder gasförmigen Medien, wo das zur Ausbildung von Scherwellen notwendige Schubmodul nicht vorhanden ist.

Bei unendlich ausgedehnten, homogenen, isotropen, elastischen Festkörper sind Longitudinal- und Transversalwellen die einzig möglich vorkommenden Wellenformen. Besitzt der Festkörper jedoch eine Oberfläche (idealisiert homogener, elastischer, isotroper, halb-unendlicher Körper), so kann an dieser Oberfläche neben den genannten Volumenwellen durch Brechung derselben in die Oberfläche hinein eine weitere Wellenform entstehen, die sogenannte Rayleighwelle. Sie hat sowohl eine transversale als auch eine longitudinale Komponente, die Teilchenbewegung beschreibt also eine elliptische Bahn. Diese Wellen sind auf die Nähe der Oberfläche des halb-unendlichen Raums beschränkt. In der Tiefenrichtung nimmt die Eindringtiefe sehr schnell ab und beträgt ungefähr nur noch eine Wellenlänge.

¹⁰⁶ (STURM & FÖRSTER, 1988)

¹⁰⁷ (BARANOV, 2007)

¹⁰⁸ (KRIM, 1996)

Ist der als Ausbreitungsmedium fungierende Körper nicht homogen, sondern besitzt mehrere Schichten, so kommt eine weitere Oberflächenwelle hinzu, die sich in der randnahen Schicht durch Reflexion und Brechung fortpflanzt. Die Teilchenbewegung erfolgt dann in einer Ebene parallel zur Oberfläche, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Diese sogenannten Love-Wellen¹⁰⁹ sind im Gegensatz zu den oben genannten Wellenformen nicht dispersionslos, ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist abhängig von der Frequenz¹¹⁰.

Die in der Realität im Bereich des Maschinenbaus für die Ausbreitung von Körperschall relevanten Strukturen sind in der Regel weder als unendliche noch als halb-unendliche Körper anzusehen. Betrachtet man z. B. eine Frequenz von 100 kHz, so ergibt sich bei einer Schallausbreitungsgeschwindigkeit für Longitudinalwellen in Stahl von etwa 6000 m/s¹¹¹ eine Wellenlänge im Bereich von 60 mm. Kann die Ausdehnung des Ausbreitungsmediums in einer Raumrichtung nicht als groß gegenüber einer Wellenlänge angesehen werden, so ist das begrenzte Medium als Platte, ist die Ausdehnung nicht groß gegenüber zwei Raumrichtungen, als Stab zu betrachten.

Für im Bereich des allgemeinen Maschinenbaus gebräuchliche Abmessungen trifft dies häufig zu, z.B. bei vielen Gehäusen und Wellen. In derartigen Strukturen bilden sich weitere Wellenformen aus: Torsionswellen in Stäben sind im Prinzip Transversalwellen mit einer Schnelle, die in Kreisbögen um die Wellenachse herum gerichtet ist.

Dehnwellen in Stäben und Platten sind das Äquivalent zu Longitudinalwellen in begrenzten Medien. Sie bilden sich aus, wenn die Ausdehnung des Mediums in einer bzw. zwei Raumrichtungen kleiner ist als die Wellenlänge der Longitudinalwelle.

Die Biegewelle schließlich besitzt neben einer transversalen auch eine Winkelbewegung. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist nicht konstant, sondern steigt mit der Quadratwurzel der Frequenz an, es liegt also Dispersion vor.

Bei der Bewertung der verschiedenen Wellenformen hinsichtlich ihrer akustischen Relevanz ist zu beachten, dass im Gegensatz zur Luftschallmessung nicht die dem statischen Druck des Ausbreitungsmediums überlagerte Druckschwankung die am häufigsten gemessene und am leichtesten zugängliche Größe darstellt. Vielmehr sind im Falle der Schallausbreitung in Festkörpern die Schallwellen mittels üblicher Sensorik im Allgemeinen nur an der Oberfläche messbar und je nach Messprinzip

¹⁰⁹ nach dem britischen Mathematiker Augustus Edward Hough Love

¹¹⁰ (GRAFF, 1975)

¹¹¹ (GRAFF, 1975)

nur dann, wenn der Schnellevektor der betreffenden Wellenformen eine Komponente senkrecht zur Oberfläche aufweist (der Schnellevektor der Love-Welle liegt z.B. in der Oberflächenebene¹¹²).

Neben der Tatsache, dass sich in festen Körpern unterschiedliche Wellenformen ausbilden, sind sie im allgemeinen Fall als elastisch anisotrop anzusehen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt deshalb neben der Wellenform auch von der Ausbreitungsrichtung ab.

2.5.3 Dämpfung

Die Absorption infolge der Dämpfungseigenschaften der involvierten Werkstoffe hat großen Einfluss auf die bei Körperschallmessungen erhaltenen Signale. Während bei Körperschall im hörbaren Frequenzbereich allgemein von einer vernachlässigbaren Dämpfung zumindest in Metallen ausgegangen wird¹¹³, ist bei hochfrequenten Körperschallwellen mit erheblicher Dämpfung zu rechnen, da diese mit der Frequenz stark zunimmt¹¹⁴.

Im dreidimensionalen Raum kommt es zu einer Abnahme der Intensität umgekehrt proportional zur Hüllfläche, der Abstand geht also quadratisch in die Abnahme der Intensität ein und linear in die Abnahme der Amplitude, zu deren Quadrat die Intensität proportional ist.

Bei zweidimensionaler Betrachtung von flachen, plattenartigen Strukturen oder Oberflächenwellen ist die Abnahme der Intensität umgekehrt proportional zur Hülllinie, der Abstand geht somit linear ein, für die Amplitude gilt entsprechend eine Proportionalität zum Kehrwert der Wurzel des Abstands. Da Oberflächenwellen also weniger als Kugelwellen abgeschwächt werden, sind sie in der Regel an der Oberfläche und somit für die Messung dominierend¹¹⁵.

Im eindimensionalen Raum bei nährungsweise stabförmigen Strukturen erfolgt schließlich eine Abnahme der Energiedichte mit der Entfernung nur aufgrund der Werkstoffdämpfung¹¹⁶.

Zu den physikalischen Vorgängen, die die Dämpfung in fester Materie bewirken, zählen unter anderem Gleit- und Diffusionsvorgänge, sowie mikroplastische

¹¹² (GRAFF, 1975)

¹¹³ (KROPP u. a., 2009)

¹¹⁴ (MÜLLER, 2004)

¹¹⁵ Kolerus (1980)

¹¹⁶ (MÜLLER, 2004)

Verformungen¹¹⁷ und Temperatenausgleichsvorgänge durch molekulare und interkristalline Versetzungsvorgänge, im speziellen Fall der Metalle verstärkt durch den polykristallinen Aufbau, der eine Schallstreuung an den Kristalliten mit sich bringt¹¹⁸. Damit erklärt sich auch der Zusammenhang zwischen den Dämpfungseigenschaften und der Vorgeschichte des metallischen Werkstoffs: Das Metallgefüge ist wesentlich von Fertigungsprozessen wie Walzen, Schmieden oder Bestrahlen mitbestimmt. Der Verlustfaktor ist somit keine allgemeingültige Materialkonstante¹¹⁹. In der maschinenbaulichen Praxis sind im Allgemeinen aus Einzelteilen zusammengesetzte technische Gebilde von Interesse. In derartigen Systemen ist die Dämpfung bei der Körperschallausbreitung über die Wirkflächenpaare zwischen Bauteilen hinweg generell als erheblich größer als die Werkstoffdämpfung anzunehmen¹²⁰, da infolge der mikroskopischen Relativbewegungen in den Wirkflächenpaaren von z.B. Verschraubungen oder Nietungen¹²¹ die interagierenden Rauheitsspitzen wie Miniaturfedern und -dämpfer wirken.

Eventuell vorhandene Zwischenschichten aus Luft, Schmiermittel oder Schmutz können ebenfalls dämpfend wirken¹²². Die in der Literatur zu findenden quantitativen Werte zur Materialdämpfung sind oft ohne oder mit sehr vagen oder für sehr kleine gültige Frequenzbereiche angegeben¹²³. Untersuchungen zur Materialdämpfung verschiedener Stoffe im sehr hochfrequenten Bereich (5 MHz) unternahm Selfridge¹²⁴. Für die im Kontext der Maschinenzustandsüberwachung relevanten Stoffe, allen voran Stahl, finden sich dort keine Angaben.

Schließlich spielen ebenfalls Reflexion und Brechung eine wichtige Rolle bei der Ausbreitung von Körperschall.

Generell kann einfallender Körperschall an der Oberfläche eines Körpers oder an der Grenzfläche zwischen zwei Körpern reflektiert oder absorbiert werden, wobei der absorbierte Anteil entweder gebrochen und durchgelassen (transmittiert) oder im Material in Wärme umgewandelt (dissipiert) wird. Letzteres entspricht der bereits diskutierten Materialdämpfung. Der Grad der Reflexion wird bestimmt durch den Impedanzunterschied zwischen den beiden Ausbreitungsmedien. Die akustische

¹¹⁷ (VDI3830-1, 2004)

¹¹⁸ (MÜLLER, 2004)

¹¹⁹ (KROPP u. a., 2009)

¹²⁰ (KROPP u. a., 2009); (KOLLMANN, 1999); (VDI3830-3, 2004)

¹²¹ ca. weniger als 10^{-6} m, s. (CREMER & HECKL, 1967), S. 252

¹²² (KROPP u. a., 2009); (VDI, 1993)

¹²³ (KOLLMANN, 1999); (CREMER & HECKL, 1967); (MÜLLER, 2004)

¹²⁴ (SELFRIDGE, 1985)

Impedanz ist definiert als das Produkt aus Dichte und Longitudinalwellengeschwindigkeit des Mediums.

Fällt, wie in Abbildung 2.13 dargestellt, eine Longitudinalwelle aus Medium 1 schräg auf die Grenzfläche zu Medium 2, so findet eine Wellentypumwandlung statt, bei der der reflektierte und der ins Medium 2 gebrochene Körperschall eine longitudinale und eine transversale Komponente hat¹²⁵. Der Schnellektor der Transversalwellen liegt in der Zeichenebene. Analoges gilt für eine einfallende Transversalwelle mit Schwingungsrichtung in Zeichenebene. Bei Schwingungsrichtung senkrecht zur Zeichenebene findet keine Wellentypumwandlung statt. Es können, abhängig vom Unterschied der Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den Medien 1 und 2, Grenzeinfallswinkel auftreten, oberhalb derer die Umwandlung in einen anderen Wellentyp vollständig ist oder Totalreflexion auftritt.

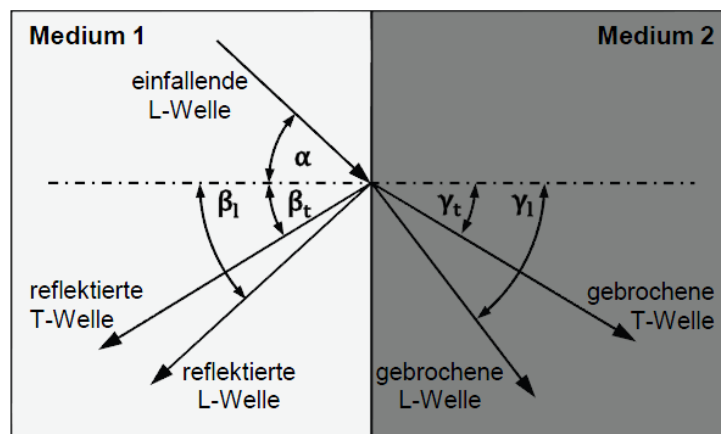


Abbildung 2.13: Reflexion und Brechung an fest-fest WFP, allgemeiner Fall¹²⁶

Bei senkrechtem Schalleinfall findet keine Wellentypumwandlung statt. Der Reflexionsfaktor ist also umso höher, je größer der Impedanzunterschied der beiden Medien ist. Für die kompliziertere Berechnung der Reflexionsfaktoren sei auf die Literatur verwiesen¹²⁷.

Aufgrund der Energieerhaltung ist die einfallende Energie stets gleich der Summe aus absorbierter (transmittierter und dissipierter) und reflektierter Energie. Die beschriebenen Voraussetzungen machen die Ausbreitung von Schallwellen in Festkörpern und vor allem in geometrisch strukturierten Objekten zu einem komplexen und umfangreichen Thema¹²⁸. Modelle zur Berechnung der Körperschallausbreitung verwenden darum häufig rechnergestützte Methoden, allen voran die

¹²⁵(KROPP u. a., 2009)

¹²⁶ (MÜLLER, 2004), S. 753, Abb. 22.1

¹²⁷ (TIETZ, 1969)

¹²⁸ (BHATIA, 1985); (GROßE, 1996)

Finite-Elemente-Methode (FEM). Dabei wird der Berechnungsaufwand mit kleiner werdender Wellenlänge bzw. steigender Frequenz immer größer¹²⁹. Die Modellierung des gesamten Schwingungsverhaltens von technischen Systemen inklusive der Schwingungs- oder Körperschallerregung macht die Kopplung von Verfahren der Mehrkörpersimulation (MKS)¹³⁰ und FEM erforderlich. Die FE-Modelle müssen bei der Kopplung stark vereinfacht werden, um mit den zur Verfügung stehenden Rechenleistungen in endlicher Zeit berechnet werden zu können. Solche reduzierten Modelle sind jedoch für die Abbildung der Ausbreitung insbesondere hochfrequenten Körperschalls nicht ausreichend detailliert. In der Literatur finden sich daher Ansätze, die Körperschallübertragung mit Hilfe berechneter oder gemessener Übertragungsfunktionen zu integrieren.

Ebenfalls problematisch ist die Simulation von Wirkflächenpaaren zwischen Bauteilen, da die zur Parametrierung entsprechender Modelle erforderlichen Kenntnisse häufig nur experimentell ermittelt werden können. In der Regel erschweren beispielsweise nicht ausreichend bekannte Dämpfungseigenschaften oder Übertragungsfunktionen sowie Nichtlinearitäten eine übertragbare theoretische Vorherbestimmung¹³¹.

Zusammenfassend kann gesagt werden, Körperschall kann aufgrund seiner Schwinggeschwindigkeit von 10^{-7} m/s bis 1 m/s und seiner Beschleunigung von 10^{-3} m/s² bis 10^4 m/s² für echtzeitfähige Untersuchungen genutzt werden, wenn der Sensor nah genug an der Körperschallquelle liegt.

2.6 Reibpaarungen in trockenlaufenden Friktionssystemen

2.6.1 Definition und Funktionsweise

Der prinzipielle Aufbau einer Reibpaarung ist in Abbildung 2.14 illustriert. Die Reibpaarung besteht aus der meist metallischen Reibscheibe und dem Reibbelag, der z.B. durch eine Klebeschicht mit dem Reibbelagträger verbunden ist. Auf der Oberfläche des Reibbelags bildet sich im Laufe des Reibprozesses die so genannte Reibschicht aus (siehe hierzu Abbildung 2.5), die aus einer Vielzahl aus Schichten besteht. Diese im Allgemeinen nur ca. 5 bis 20 µm dicke Schicht schützt den darunter liegenden Reibbelagswerkstoff vor thermischer Zerstörung und bestimmt maßgeblich die Reibungs- und Verschleißigenschaften der gesamten Reibpaarung.

¹²⁹ (SARRADJ, 1998)

¹³⁰ (TKACHUK u. a., 2009)

¹³¹ (KOLLMANN, 1999)

Erst diese Reibschicht ermöglicht es dem Reibbelag, hohe thermische Belastungen bei gleichzeitig geringem Verschleiß zu ertragen.

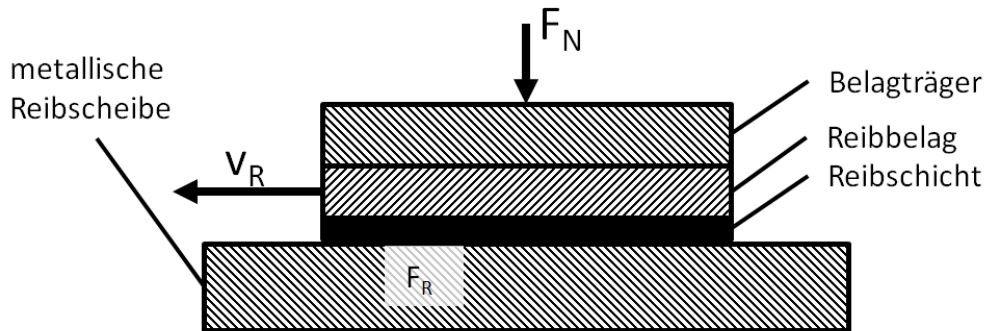


Abbildung 2.14: Prinzipieller Aufbau einer Reibpaarung bei metallischen Reibpartnern¹³²

Die Eigenschaften des Reibbelags bei thermischer Belastung sind nicht sehr gut reproduzierbar und sind dadurch nur bedingt gut zu untersuchen. Der Ablauf der Prozesse in der Kontaktzone ist bis zum heutigen Tag noch weitgehend unbekannt. Eine Einordnung der verschiedenen Reibbeläge beruht daher auf den globalen Reibungs- und Verschleißigenschaften, unter der Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der thermischen Belastung¹³³. Es wird vor allem auf dem organisch gebundenen Belag, die den Reibprozess steuernde Reibschicht gebildet¹³⁴.

Die Größe der mittleren Reibungszahl, in Abhängigkeit der Belastungsparameter, sowie die Vermeidung der Entstehung von Reibschwingungen durch die Reibpartner sind die bedeutenden Beurteilungskriterien¹³⁵. Zusammenwirken der drei Größen Reibflächentemperatur, Reibarbeit und Reibleistung bestimmen im Wesentlichen die Reibungs- und Verschleißigenschaften einer Paarung¹³⁶. Dabei hat die Reibleistung den größten Einfluss auf die thermische Belastung. Hierbei spielen die mittlere Reibungszahl, die Flächenpressung und die Reibgeschwindigkeit eine große Rolle¹³⁷. Eine Erklärung für die Funktionalität der ablaufenden Prozesse ist in der Regenerationsfähigkeit des Reibwerkstoffs aufgezeigt.

Letztlich sind die durch KLEINLEIN experimentell bestätigten, gesetzmäßigen Ergebnisse darauf begründet, dass im Wechsel stets Flächenelemente des Reibbelags hoch thermisch beansprucht werden, wohingegen sich zu diesem Zeitpunkt thermisch weniger stark beanspruchte Flächenelemente regenerieren. Ist

¹³² Nach (VDI, 1997)

¹³³ (KLEINLEIN, 2005)

¹³⁴ (VDI, 1997)

¹³⁵ (KLEINLEIN, 2005)

¹³⁶ (VDI, 1997)

¹³⁷ (ALBERS u. a., 2009a, 2011a; ALBERS, 2009)

dieser Regenerationsprozess nicht möglich, führt dies zum Versagen der Reibpaarung. Die Klärung der physikalischen und chemischen Zusammenhänge stellt ein Ziel der aktuellen Forschung dar^{138,139}.

Die als Reibbelag verwendeten Reibwerkstoffe in dieser Arbeit sind trockenlaufende komplexe Materialverbundwerkstoffe, und finden unter anderem in Kupplungen und Bremsen Anwendung. Sie werden aus Bindematerial, Reibstoffen und Gleitstoffen gebildet. Im Bereich der Bremstechnik treten sie beispielhaft in Form von Carbon-Reibwerkstoffen, Sinterreibwerkstoffen oder organisch gebundenen Reibwerkstoffen auf¹⁴⁰. Karbon-Karbon-Reibbeläge finden ihren Einsatz im Rennsport sowie im Flugzeugbau und sind thermisch extrem belastbar. Ein Reibbelag setzt sich aus den unterschiedlichsten Stoffen zusammen. Die Fertigung der Reibbeläge erfolgt unter hoher Pressung und hohem Druck unter Zugabe eines Bindemittels, wie z.B. Phenolharz¹⁴¹. Wegen ihrer Bedeutung in dieser Arbeit soll das Thema Verbundwerkstoffe in dem folgenden Kapitel genauer beleuchtet werden.

2.6.2 Verbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe oder englisch "Composites" definieren sich nach REISSNER¹⁴² wie folgt:

"...Verbundwerkstoffe sind Werkstoffe, die durch geschickte Kombination verschiedener, meist ungleichartiger Werkstoffkomponenten in geeigneter Form und geeigneter Verteilung bessere und zum Teil neue Eigenschaften aufweisen."

Ein natürlich vorkommendes Beispiel für diese Werkstoffgruppe ist Holz, da es aus mehreren Lagen verschiedener Zellwände aufgebaut ist. Grund für die immer häufiger verwendeten Verbundwerkstoffe und deren ständige Weiterentwicklung sind deren Einsatzmöglichkeiten, da die zunehmend steigenden Anforderungen an Materialien nicht mehr durch bereits bekannte Werkstoffe erfüllt werden können. Ein Beispiel hierfür ist die zunehmende Gewichtsreduzierung im Fahrzeugbau.

Um den Anforderungen der Industrie, wie z.B. einer Steigerung des Reibwerts bei gleichzeitiger Minimierung der Baugröße, gerecht zu werden, sind sehr vielschichtige Anforderungen seitens der Werkstoffe, wie eine Massenreduzierung und eine Wärmeableitung aus dem Material, zu erfüllen.

¹³⁸ (KLEINLEIN, 2005)

¹³⁹ (ALBERS u. a., 2009c)

¹⁴⁰ (POESTE, 2005)

¹⁴¹ (VDI, 1997)

¹⁴² (REISSNER, 2010)

Die Vorteile von Verbundwerkstoffen sind vielseitig: So sind grundsätzlich Kombinationen aus allen Werkstoffklassen möglich, so dass Werkstoffe mit einer Vielzahl an Eigenschaften entstehen können. So können grundsätzlich neue Produkteigenschaften entstehen, die die Einzelmaterialien der Verbundwerkstoffe nicht aufweisen¹⁴³. Grundgedanke der Verbundwerkstoffe ist die Arbeitsteilung im Verbund¹⁴⁴, welche zu einer höheren Leistung, besseren Funktionen und Einsparungen bei Material, Energie und Kosten führt.

Ein Verbundwerkstoff besteht aus einer Matrix und einer Phase. Die Matrix - auch Grundmasse, Kernwerkstoff oder Mutterphase genannt - ist der dominierende Werkstoff innerhalb des Verbundes. Sie schützt die verstärkende Phase vor äußeren Einwirkungen und fixiert diese in ihrer Lage¹⁴⁵. Durch die Einlagerung der verstärkenden Phase in Form von Fasern kommt es zu einer Faser-Matrix-Kopplungsschicht, der sogenannten Grenzfläche oder -phase. Dies führt zu einem Dreiphasenmodell (Faser-Grenzschicht-Matrix), wodurch sich Vorgänge im Verbundwerkstoff besser erklären lassen. Funktion dieser Grenzphase ist es, als Haftvermittler zwischen Faser und Matrix zu wirken und gleichzeitig die Fasern vor Beschädigung und Bruch zu schützen. In der Grenzfläche zwischen Matrix und Grenzschicht finden auch Wechselwirkungen statt, wie Adhäsionsvorgänge und/oder chemische Reaktionen. Verbundwerkstoffe können in Abhängigkeit der Matrix eingeteilt werden. Dabei unterscheidet man folgende Matrixtypen¹⁴⁶:

- Metallische Verbundwerkstoffe
- Polymerische Verbundwerkstoffe
- Keramische Verbundwerkstoffe

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird nur auf Verbundwerkstoffe mit einer polymerischen Matrix detaillierter eingegangen, da es sich bei den Reibbelägen, die im Zuge dieser Arbeit verwendet wurden, um Polymer-Matrix-Composites handelt. Polymer-Matrix-Composites können sowohl auf pflanzlichen als auch auf synthetischen Materialien basieren.

Verbundart

Integriert in die Matrix liegt die verstärkende Phase. Diese Einlagerungen in den überwiegenden Werkstoff lassen sich in vier Strukturarten, sogenannte Verbundar-

¹⁴³ (REISSNER, 2010)

¹⁴⁴ (WEISSBACH, 2010)

¹⁴⁵ (WEISSBACH, 2010); (NEITZEL & MITSCHANG, 2004)

¹⁴⁶ (NEITZEL & MITSCHANG, 2004)

ten, unterteilen. Es gibt, wie in Abbildung 2.15 zu sehen, die Teilchen-, Faser-, Schicht- und Durchdringungsverbundwerkstoffe.

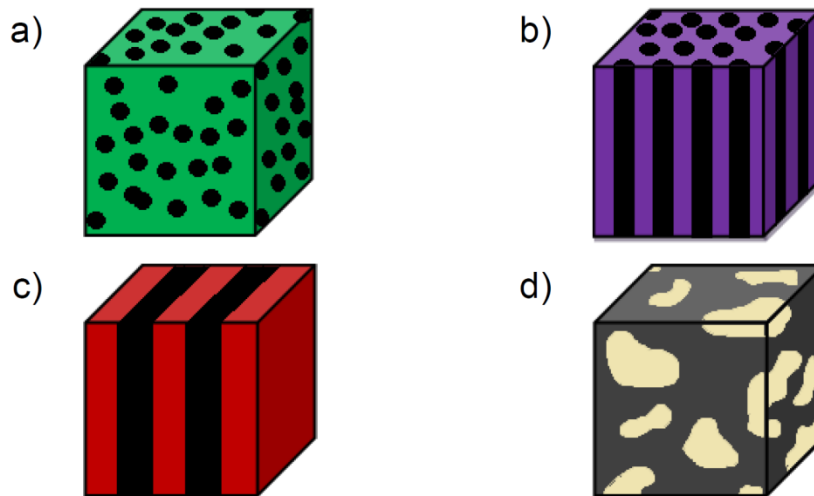


Abbildung 2.15: Einteilung der Verbundwerkstoffe nach Reissner¹⁴⁷ in a) Teilchen; b) Faser; c) Schicht; d) Durchdringung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur teilchen- und faserverstärkte Reibbelägen genauer betrachtet.

Teilchenverbundwerkstoff

Teilchenverbundwerkstoffe sind weitestgehend isotrope Werkstoffe, also Werkstoffe deren Teilchenausrichtung unabhängig von den Eigenschaften ist. Die Teilchen haben in der Matrix eine rundliche oder unbestimmte geometrische Form¹⁴⁸. Diese verstärkende Phase besitzt keine ausgeprägte Vorzugsrichtung. Die Herstellung dieser Verbundwerkstoffe ist recht aufwendig, da die einzelnen Bestandteile keine gegenseitige Löslichkeit aufweisen sollen. Dadurch sind herkömmliche schmelzmetallurgische Verfahren nicht anwendbar, sondern man muss auf pulvermetallurgische Verfahren zurückgreifen. Hierbei werden zur Erzeugung dieser Verbundart vor allem Pressen mit anschließendem Sintern, mechanisches Legieren und Diffusionsreaktion verwendet. Teilchenverbundwerkstoffe werden eingesetzt, wenn eine hohe Lebensdauer gefordert ist und eine hohe Werkstoffhärte benötigt wird¹⁴⁹.

Faserverbundwerkstoff

Diese Verbundart besteht aus einer Matrix mit Fasern als verstärkender Phase. Die Anordnung der Faserrichtung und die Faserhäufigkeit haben einen eklatanten Einfluss auf die Eigenschaften des Werkstoffes. Faserverbundwerkstoffe sind

¹⁴⁷ (REISSNER, 2010)

¹⁴⁸ (WEISSBACH, 2010)

¹⁴⁹ (REISSNER, 2010)

gewichtsspezifisch optimale Leichtbauwerkstoffe durch gezielte Faserverstärkung und werden auch als Hochleistungsverbundwerkstoffe bezeichnet¹⁵⁰. Diese Verbundart wird am meisten genutzt, da sie in fast jedem technischen Anwendungsfeld aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften einsetzbar sind¹⁵¹.

Bei der Richtungsorientierung der Fasern unterscheidet man nach WEISSBACH drei Ausprägungsformen: Unidirektional, Bidirektional und Multidirektional. In einem Werkstoff mit einer unidirektionalen Orientierung liegen alle Fasern möglichst exakt parallel. Dies führt dazu, dass die Zugfestigkeit in Faserrichtung sehr hoch ist. Bei bidirektionaler Faserrichtung liegen die Fasern im Verbund unter einem Winkel von 90° zueinander. Liegt dagegen ein Faserverbundwerkstoff mit einer multidirektionalen Faserrichtung vor, so wird man keine zugrunde liegende Struktur erkennen¹⁵².

Betrachtet man nun die Faserhäufigkeit, so unterscheidet man zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Fasern¹⁵³. Eine kontinuierliche Faserhäufigkeit ist gleichmäßig und lückenlos zusammenhängend. Dagegen ist eine diskontinuierliche Faserhäufigkeit unzusammenhängend und mit räumlichen Unterbrechungen aufeinanderfolgend.

Allgemein wichtig bei faserverstärkten Verbundwerkstoffen ist, dass feste und steife Fasern in eine schwache Matrix mit niedriger Festigkeit und Steifigkeit eingebettet sind. Dies führt zu starken Steifigkeitsunterschieden zwischen Fasern und Matrix und bewirkt, dass die Matrix nur gering belastet wird und die Fasern den größten Teil der Belastung aufnehmen¹⁵⁴.

Typische Beispiele für Fasern dieser Verbundart sind Glasfasern, Kohlenstofffasern, Aramidfasern, Stahlfasern oder Naturfasern (beispielsweise Wolle oder Pflanzenfasern). Natürlich ist auch die Verwendung verschiedener Fasern möglich. Dies bezeichnet man als Hybridverstärkung¹⁵⁵.

Trockenlaufende Reibbeläge bestehen nach KLEINLEIN und GAUGER aus¹⁵⁶:

- organischem Bindemittel (Kautschuk, Harze) als Matrixwerkstoff
- Faserstoffe (natürliche, synthetische und metallische Fasern) für die mechanische Festigkeit und thermische Widerstandsfähigkeit

¹⁵⁰ (NEITZEL & MITSCHANG, 2004)

¹⁵¹ (WEISSBACH, 2010)

¹⁵² (WEISSBACH, 2010)

¹⁵³ (REISSNER, 2010)

¹⁵⁴ (KRENKEL, 2003)

¹⁵⁵ (NEITZEL & MITSCHANG, 2004)

¹⁵⁶ (KLEINLEIN, 2005); (GAUGER & INGENIEURE, 1998)

- Füllstoffe und Reibwertmodifikatoren (Gleitmittel, Oxide, Reibwertstützer, Metalle) zur Verschleißfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Dämpfungsverhalten und Temperaturbeständigkeit, Reibungszahlhöhe und –konstanz.
- Hilfsstoffe (Weichmacher, Lösungsmittel und Vulkanisationsbeschleuniger) zur Beeinflussung des Herstellungsprozesses

Im Allgemeinen werden Reibbeläge bestehend aus einer Vielzahl anorganischer Werkstoffe mittels Kunstharz oder Kautschuk, als organischem Bindemittel, bei hohen Temperaturen und Drücken zu einem Festkörper geformt¹⁵⁷.

Die Matrix der häufig abrasiv wirkenden keramischen sowie metallischen Fasern organisch gebundener Reibbeläge in Bremsen wird durch das Bindemittel geliefert. Abrasiv wirkende Reibstoffe sind Aramidfasern, Stahlwolle, Glasfaser, Glimmer, Aluminiumoxid, Schwerspat und Asbest, wobei letzteres im Jahre 1993 in Deutschland aus gesundheitlichen Gründen verboten wurde¹⁵⁸. In Tabelle 2.1 sind die wichtigsten Elemente der Reibwerkstoffe zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Elemente der Reibwerkstoffe¹⁵⁹

Bindemittel	Fasern	Mineralische Füllstoffe	Oxide	Metalle	Gleitmittel
Phenolharz Melaminharz Kautschuk	Stahlwolle Messingwolle Glasfaser Wollastonit Aramid	Glimmer Schiefermehl Kaolin Schwerspat Kreide	Zinkoxid Magnesiumoxid Eisenoxid Chromoxid Aluminiumoxid Siliziumoxid	Eisen Kupfer Zink Messing Bronze	Graphit Sulfide Koks

Die Begrenzung der Temperaturbelastung sowie der Einfluss auf das Reibgeschehen sind bedeutsame Eigenschaften der organischen Bindemittel. Die thermische Belastbarkeit der Reibbeläge wird ausschlaggebend von den Faserstoffen bestimmt¹⁶⁰.

Die gesetzmäßige Änderung der Reibungs- und Verschleißigenschaften bei Reibpaarungen mit organischen gebundenen Reibwerkstoffen, ebenso wie die ständige Änderung der lokalen Reibflächenzone, ist durch das Gedankenmodell von MUSIOL in Abbildung 2.16 visuell verdeutlicht¹⁶¹.

¹⁵⁷ (POESTE, 2005)

¹⁵⁸ (POESTE, 2005)

¹⁵⁹ (VDI, 1997)

¹⁶⁰ (VDI, 1997)

¹⁶¹ (SEVERIN & MUSIOL, 1995)

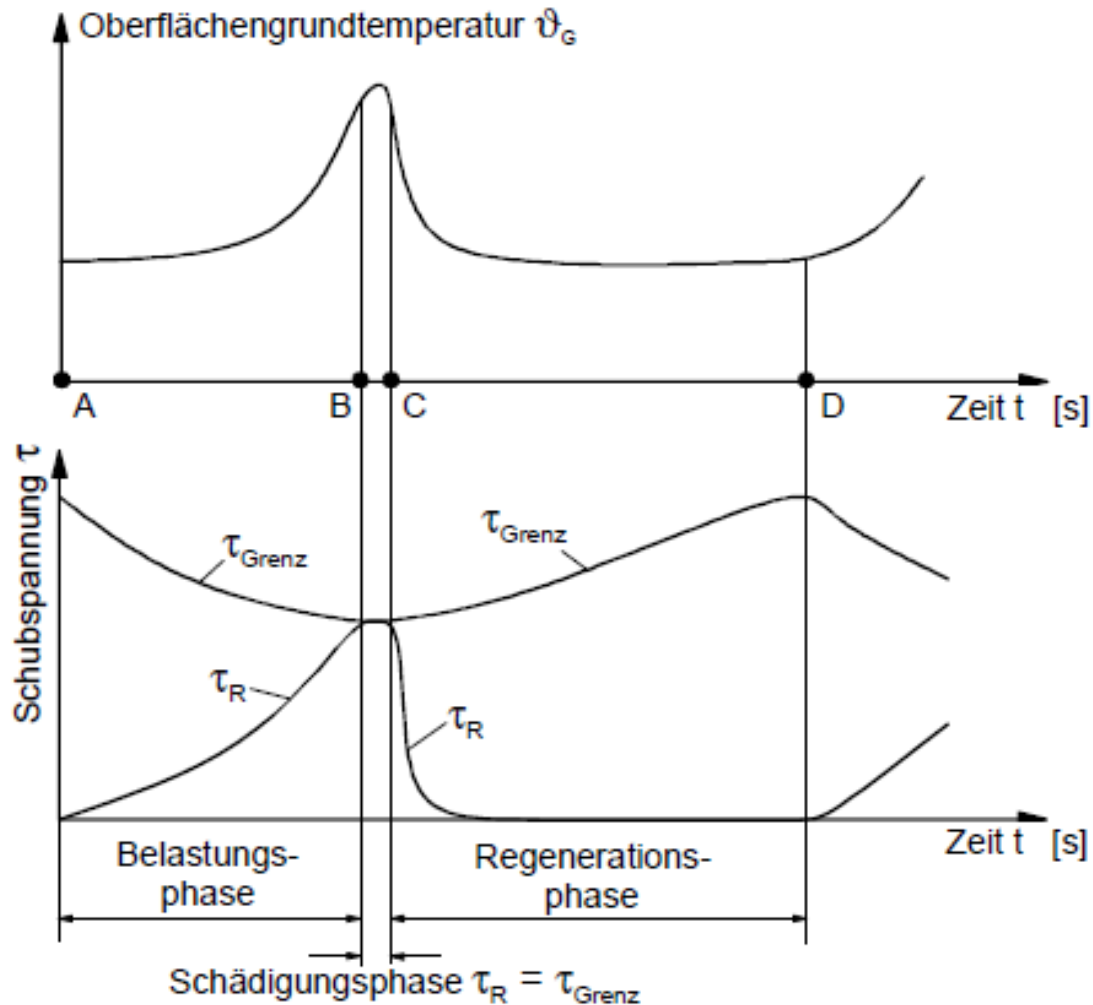


Abbildung 2.16: Gedankenmodell zur Erklärung der Vorgänge in der Reibzone¹⁶²

Eine besondere Eigenschaft von Reibsystemen ist, dass sie nach einer thermischen Überlastung regenerieren. Dies gilt für die gesamte Reibfläche wie für ein begrenztes Flächenelement innerhalb der Reibfläche. Die oben genannten Untersuchungen führten zu der Erkenntnis, dass die thermische Belastung in einem solchen Reibflächenelement nicht konstant ist, sondern sich ständig verändert. Das Modell verfolgt gedanklich ein beliebiges Volumenlement der Reibschicht, das im Vergleich zur Gesamtreibfläche des Belages infinitesimal ist. Infolge der globalen Normalkraft F_N erfährt dieses Teilchen augenblicklich eine Normalspannung, die multipliziert mit der augenblicklichen lokalen Reibungszahl μ_{lok} die Reibschubspannung in der Reibzone bestimmt. Die Historie des Reibschichtelement in einem Reibprozess stellt Abbildung 2.16 dar. Sie zeigen schematisch, wie sich im fortschreitenden Reibprozess die Reibschubspannung und die lokale Reibflächentemperatur in

¹⁶² (SEVERIN & MUSIOL, 1995)

diesem Volumenelement ändert, wobei beide Größen in Wechselwirkung zueinander stehen.

Das betrachtete Teilchen beginnt sich in Punkt A aktiv an der Reibkraftübertragung zu beteiligen. Zu diesem Zeitpunkt ist die Reibflächengrundtemperatur des Kontaktpartners im Mittel. Die weitere Belastungsphase ist durch einen fortschreitenden Anstieg der Reibschubspannung gekennzeichnet, was wiederum den Anstieg der lokalen Reibflächentemperatur und deswegen einen entsprechenden Abfall der Schubfestigkeit zwischen dem Reibschichtelement und dem Grundwerkstoff zur Folge hat. Treffen sich τ_R und τ_{Grenz} einander in B, so setzt der Schädigungsmechanismus ein. Das betreffende Schichtelement wird in der folgenden Schädigungsphase BC abgesichert und als Verschleißpartikel abgetragen. Diese Entlastung führt zu einer schlagartigen Minderung der dort übertragenen Schubspannung und der lokalen Reibflächentemperatur. In dem sich anschließenden Regenerationsprozess CD kann sich an gleicher Stelle nun ein neues Reibschichtelement bilden, das sich vom Zeitpunkt D an aktiv am Reibprozess beteiligt und der Prozess somit von vorne beginnt. Da viele derartige Teilprozesse in der Kontaktzone gleichzeitig wirken, stellt sich nach außen gesehen ein quasistationärer Reibzustand ein, solange ein Gleichgewicht besteht zwischen dem lokalen Aufbau und dem Abtrag der Reibschicht, d.h. solange die einzelnen geschädigten Flächenelemente genügend Zeit zur Regeneration haben. Wenn die Zeit dafür nicht ausreichend ist, kommt es zu einer fortschreitenden Schädigung der gesamten Reibschicht, was sich durch einen Abfall der mittleren Reibungszahl auf einen relativ kleinen Wert und durch einen starken Anstieg des Reibbelagsverschleißes bemerkbar macht. Da sich die Reibkraft stets ungleichmäßig über die Reibfläche verteilt, wird es auch bei relativ kleiner äußerer Belastung Reibflächenbereiche geben, die geschädigt werden. Jeder Reibprozess produziert daher zwangsläufig Verschleiß¹⁶³.

Seit Jahren wird auch am IPEK im Rahmen der Antriebsstrang- und Kupplungssystemforschung der Einfluss einzelner System- und Umgebungsbedingungen auf das Verhalten von trockenlaufenden Kupplungen mit organischen Reibbelägen untersucht.¹⁶⁴ Ziel der Untersuchungen soll die Identifizierung und Quantifizierung der für das Systemverhalten der Kupplung wesentlichen Einflussparameter und die Abbildung dieser Parameter in einem Erklärungsmodell sein. Durch die Verknüpfung von Versuch und Simulation soll damit ein ganzheitliches Modell zur Vorhersage des Verhaltens der Kupplung im System geschaffen werden. Die Entwicklung der hierzu

¹⁶³ (SEVERIN & MUSIOL, 1995)

¹⁶⁴ (ALBERS u. a., 2010d);(ALBERS u. a., 2005b)

benötigten physischen (z.B. Prüfständen) und virtuellen Modelle (z.B. Berechnungsmodelle) erfolgt auf Basis des Erklärungsmodells und unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Teilmodellen und der späteren Integration zum Gesamtmodell.

Betrachtet man den Aufbau des Tribosystems genauer, erkennt man, dass Veränderungen in Geometrie und Aufbau des Friktionssystems die Struktur des Tribosystems insgesamt verändern. So gelangt durch den geringeren Überdeckungsgrad beim Teilbelagversuch Umgebungsmedium wesentlich einfacher als beim Gesamtelag in den Kontakt.¹⁶⁵ Abbildung 2.17 und Abbildung 2.18 beschreiben die Modellvorstellungen für die Einflussfaktoren Geometrie und Aufbau auf das Kupplungsmodell zur Beschreibung des Kupplungssystemverhaltens.

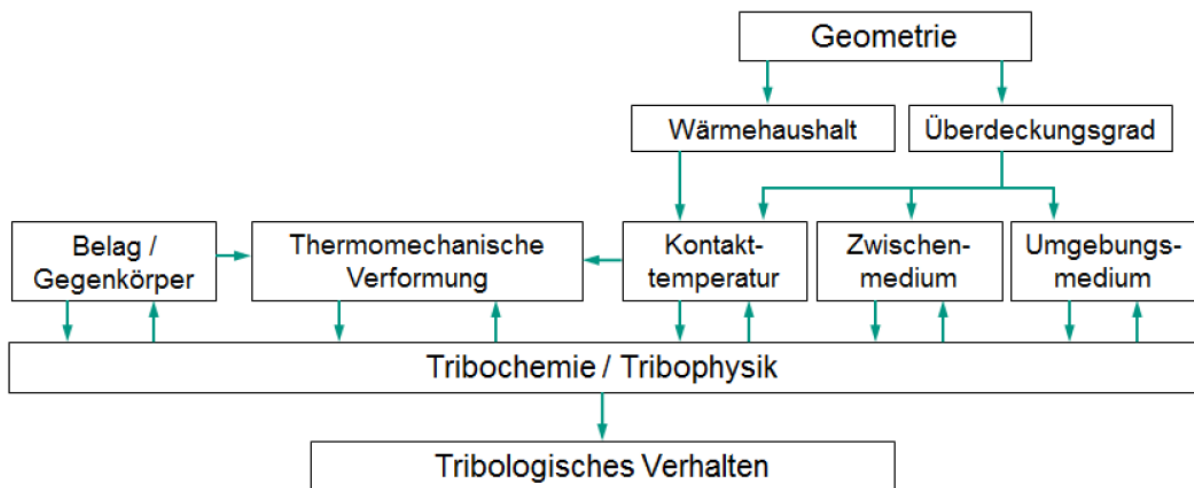


Abbildung 2.17: Modellvorstellung Geometrieinfluss¹⁶⁶

Da das Friktionssystem im Teilbelagversuch auf den Tribokontakt reduziert ist, weisen die Friktionssysteme auch unterschiedliche mechanische und thermische Eigenschaften auf. Selbst bei gleicher äußerer Belastung werden Temperaturverteilung und Belastung im Kontakt voneinander abweichen. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturverteilung und Belastung wird sich das Friktionssystem auch unterschiedlich thermomechanisch verformen.

¹⁶⁵ (BOERJESSON u. a., 1993)

¹⁶⁶ (ALBERS u. a., 2011c)

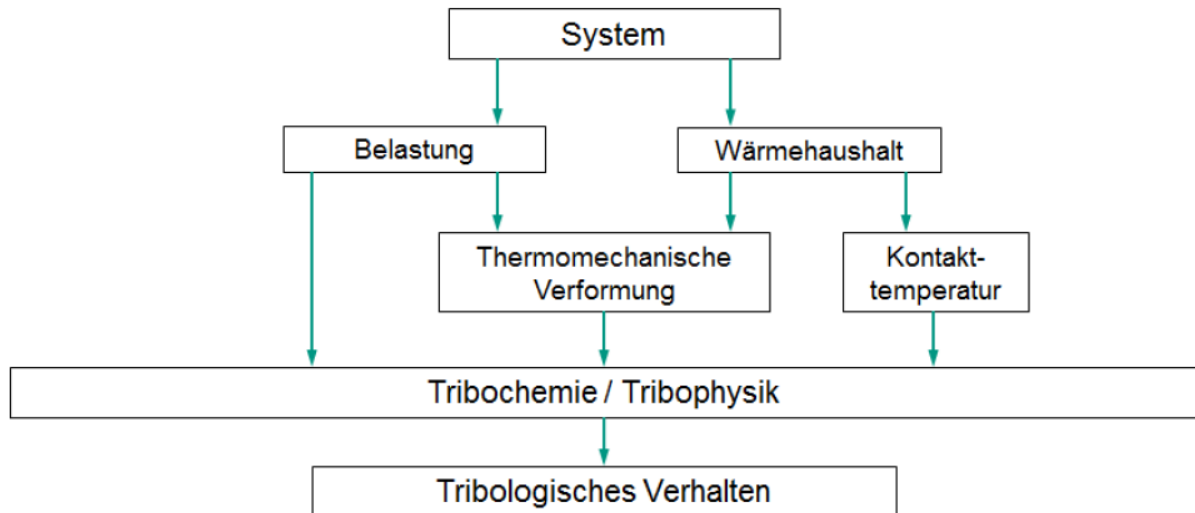


Abbildung 2.18: Modellvorstellung Einfluss Aufbau¹⁶⁷

Belag- und Gegenmaterial müssen stets gemeinsam betrachtet werden. Der Reibpartner des Reibstoffs besteht oftmals aus einem metallischen Werkstoff, wie Gusswerkstoff, Stahl oder einer Aluminiumlegierung und übernimmt zumeist die wichtige Aufgabe der Wärmeaufnahme und damit auch des Wärmetransports¹⁶⁸. Organisch gebundene Reibbeläge weisen für Grauguss als Gegenreibe ein geeignetes Verhalten auf; bei geringem Verschleiß an den Reibbelägen und am Gegenkörper¹⁶⁹.

Die wichtigsten Anforderungen an Reibwerkstoffe sind gemäß SEVERIN¹⁷⁰ eine große thermische Belastbarkeit, eine konstante Reibungszahl μ über einen großen Belastungsbereich, ein möglichst kleiner Eigenverschleiß, keine Aggressivität gegenüber anderen Reibpartnern, keine Wärmeleitfähigkeit, Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse, keine Geräusche und keine Schädigung durch Abrieb und Gase. Diese Anforderungen werden nie alle vollständig erreicht, daher muss die Bedeutung der einzelnen Eigenschaften im speziellen Anwendungsfall eingeordnet werden.

Bei organischen Reibbelägen treten ebenfalls die in Kapitel 2.1.7.3 beschriebenen Verschleißmechanismen auf. Diese sollen vermieden werden. Daher werden zur Abschwächung oder Vermeidung der Adhäsion und zum Ausgleich von Rauheiten Gleitwerkstoffe wie Graphit, Koks, Gesteinspulver sowie Eisen-, Zink-, Magnesi-

¹⁶⁷ (ALBERS u. a., 2011c)

¹⁶⁸ (KLEINLEIN, 2005)

¹⁶⁹ (WALTHER u. a., 2004)

¹⁷⁰ (VDI, 1997)

umoxide und Kupfer eingesetzt. Generell führen Gleitwerkstoffe, aufgrund ihrer schmierenden Eigenschaft, zu einer Reibwertminimierung¹⁷¹.

Neue organische Reibbeläge werden in empirischen Untersuchungen ermittelt, da bereits geringe Anteile der Komponenten einen bedeutsamen Einfluss auf die Eigenschaften des gesamten Belages ausüben können¹⁷².

2.6.3 Verschleißverhalten von organischen Reibbelägen

Je nach Verbundart kann die Verschleißrate auch unterschiedlich variieren. Die Partikelgrößen sind hierbei auch je nach Zusammensetzung und Verbundart unterschiedlich. Bei einer Untersuchung von organisch gebundene Bremsscheiben und den entstehenden Partikel kam beispielhaft folgende Partikelgrößenverteilung zustande¹⁷³:

- <30 µm 1%
- 30-50 µm 14%
- 50-100 µm 11%
- 100-150 µm 74%

Die Verteilung variiert selbstverständlich für andere Verbundwerkstoffe und andere Belastungskollektive, aber man erkennt die große Varianz der entstehenden Partikelgrößen, die beim Reiben entstehen. Dieses große Spektrum ist allen Verbundwerkstoffen gemein und unabhängig von der Zusammensetzung und dem Aufbau des Verbundwerkstoffes.

2.7 Analysemöglichkeiten an Friktionssystemen

Es gibt unzählige Analysemöglichkeiten von Friktionssystemen, sowohl offline als auch online, sowie im trockenlaufenden als auch im nasslaufenden Bereich. An prinzipiellen Messprinzipien für Verschleiß und Oberflächendetektion sind vor allem die optischen und mechanischen Messkonzepte zu erwähnen.

Auf Grund des Schwerpunktes der Arbeit auf Online-Analyseverfahren soll nun auf diese näher eingegangen werden.

¹⁷¹ (POESTE, 2005)

¹⁷² (POESTE, 2005)

¹⁷³ (LIBSCH, 1978)

Unter diesem Gesichtspunkt bieten sich Methoden der Schwingungs- und Körperschallmessung an, da die relevanten Messgrößen oft auch in größerer Entfernung vom tribologischen Kontakt wahrnehmbar sind.

Es gab aber bisher kein Onlineverfahren, das eine direkte Verschleißmessung an trockenlaufenden Friktionssystemen zulässt. Der Blick auf die Analyseverfahren bei nasslaufenden Tribosystemen soll die Möglichkeiten in diesem Anwendungsfeld beleuchten. Die Kenntnis über diese Verfahren ist wichtig für die spätere Auswahl und das mögliche Potential zur Modifikation trockenlaufender Online-Analyseverfahren.

Die im Folgenden vorgestellten Onlineverfahren stellen eine Auswahl aus der Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Methoden dar, zu denen sämtliche Verfahren der volumetrischen Werkstoffprüfung, der optischen Diagnostik, der Oberflächendiagnostik, der thermischen Diagnoseverfahren, der Schwingungsdiagnostik, der Schallemission, der Prozessparameterdiagnostik sowie der Partikel- und Betriebsmediendiagnostik zählen. Am Besten sind prinzipiell Methoden, die das zu beobachtende System nicht oder kaum beeinflussen, also möglichst rückwirkungsfrei arbeiten.

2.7.1 Online-Analyse-Möglichkeiten bei nasslaufenden Friktionssystemen

Optische Partikel Analyse (OPA)¹⁷⁴

Die OPA wird in nasslaufenden Friktionssystemen genutzt, um Verunreinigungen im Öl zu erfassen und auf deren Herkunft schließen zu können. Dabei werden ein paar Milliliter einer Ölprobe mit kontinuierlicher Geschwindigkeit durch ein Sichtfenster gepumpt. Durch dieses Fenster strahlt ein von einer Diode erzeugtes Laserlicht mit bis zu 350m/sec. In dem Fenster wird der Ölfilm sehr dünnflächig ausgebreitet und ist damit so transparent, dass sich alle Umrisse der Verunreinigungen im Öl abzeichnen. Hinter dem Fenster befindet sich zusätzlich eine Linse, mit deren Hilfe die ölfremden Bestandteile vergrößert werden, sodass sie von einer Kamera in Schwarz-Weiß-Fotos digital festgehalten werden können.

Die Partikel, die das Licht reflektieren, erscheinen als dunkle Stellen auf dem Bild. Die Bilder werden an einen Computer weitergeleitet, der mit Hilfe einer Software die Umrisse der Teile katalogisiert und bestimmten Kategorien wie Ermüdungsver-schleiß, spanförmigem Verschleiß, nichtmetallischen Verunreinigungen, Luftbläschen, Wassertröpfchen, Fasern etc. zuordnet. Die Anzahl der Partikel je

¹⁷⁴ Quelle: („OELCHECK GmbH“)

Kategorie und deren Größe ermöglicht einen Rückschluß auf die Ursache für den abgebildeten Verschleiß oder eine Verunreinigung im Öl.

Radionuklidtechnik (RNT)

Das leistungsfähigste Verfahren zur kontinuierlichen und quantitativen Bestimmung des Verschleißes tribologischer Systeme in Echtzeit stellt die Radionuklidtechnik dar. Insbesondere im Feld der Verbrennungsmotorenentwicklung ist es als Validierungswerkzeug tribologischer Systeme weit verbreitet. Die Auflösungsgrenze liegt hierbei bei einigen Nanometern¹⁷⁵.

Als Radionuklide werden alle Nuklide (Atomsorten) bezeichnet, die sich aufgrund der Instabilität ihrer Kerne unter Energieabgabe in andere Nuklide umwandeln ("radioaktiver Zerfall"). Die Funktionsweise der Methode ist in Abbildung 2.19 dargestellt.

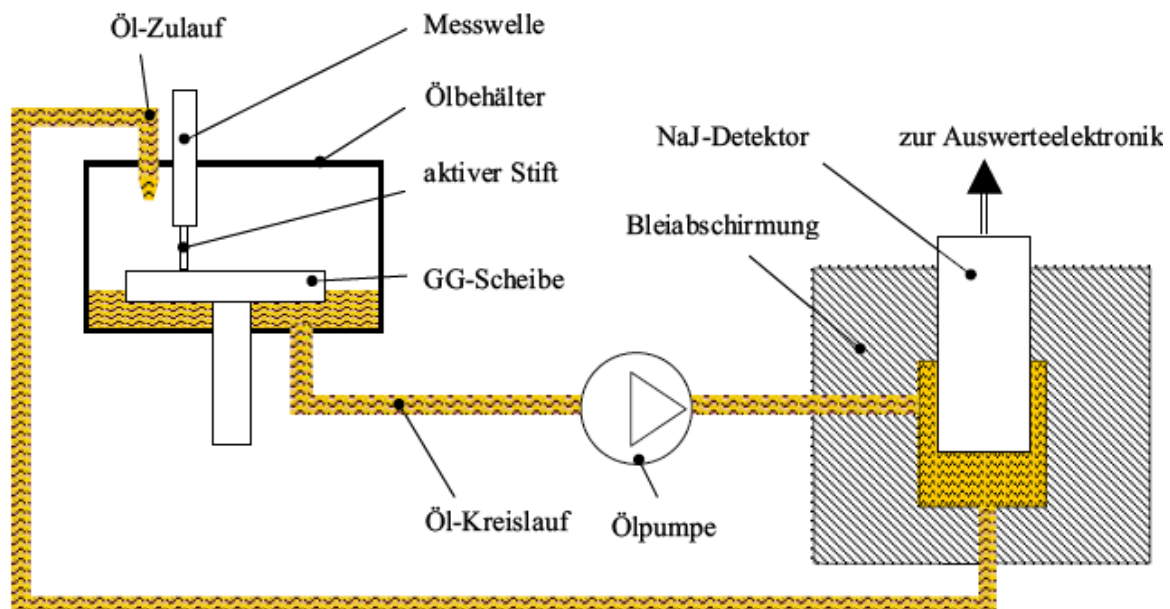


Abbildung 2.19: Aufbau einer Anlage zur RNT Messung - Durchflussmessverfahren¹⁷⁶

Die Radionuklidtechnik nutzt die dabei entstehende ionisierende Strahlung zur Detektion radioaktiver Verschleißpartikel, die aus den zuvor aktivierten Reibpartnern stammen und erlaubt einen Rückschluss auf den Verschleißbetrag. Die Aktivierung geschieht entweder in einem Reaktor durch Bestrahlung mit thermischen Neutronen oder durch Beschuss mit schweren geladenen Teilchen (Deuteronen oder α -Teilchen) in Teilchenbeschleunigern. Bei dieser Aktivierung kommt es jedoch zu keiner Beeinflussung des tribologischen Verhaltens der bestrahlten Reibpartner. Die

¹⁷⁵ (SCHERGE u. a., 2003)

¹⁷⁶ (SHAKHVOROSTOV, 2005)

Messung erfolgt meist durch Szintillationszähler, welche die Anzahl der radioaktiven Ereignisse detektieren, aus denen dann unter Berücksichtigung von Kalibrierungsdaten wie der Halbwertszeit der verwendeten Radioisotope der Verschleissbetrag berechnet wird.

Zur Verschleissbestimmung mittels Radionuklidtechnik sind zwei Messprinzipien etabliert:

Beim Konzentrationsmessverfahren (auch Durchflussmessverfahren) werden die radioaktiven Verschleisspartikel im Schmiermittelstrom durch einen Detektor transportiert. Der Verschleissbetrag wird aus der Strahlung pro Volumen des transportierenden Mediums berechnet. Es sind sehr geringe Aktivitäten, teilweise niedriger als die natürliche Umgebungsstrahlung, ausreichend.

Beim Dünnschichtdifferenzmessverfahren stellt die Abnahme der Radioaktivität der Reibpartner infolge der abgetragenen Verschleisspartikel die Messgröße zur Berechnung der Verschleissmasse dar. Die Messung kann häufig auch durch Gehäusewände hindurch von der Außenseite des untersuchten Systems erfolgen. Ein Fluidstrom ist nur zum Abtransport der Verschleisspartikel vom Entstehungsort erforderlich. Dieses Verfahren wird wegen seines wesentlich geringeren Auflösungsvermögens nur angewendet, wenn das Konzentrationsmessverfahren nicht applizierbar ist.

Die RNT bietet eine hohe Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Auflösung. Daher ist das Verfahren zur Anwendung an nasslaufenden Tribosystemen mit geringen Verschleissraten geeignet. Aufgrund der kosten- und aufwandsintensiven Applikation sowie nicht zuletzt der erforderlichen Einhaltung gesetzlicher Sicherheitsvorschriften ist der Einsatz der RNT auf den Bereich der Forschung und Entwicklung in entsprechend zertifizierten Institutionen beschränkt.

2.7.2 Online-Analyse-Möglichkeiten bei trockenlaufenden Friktionssystemen

Temperaturmessung

Lokale Reibereignisse führen durch einen lokal hohen Energieeintrag und durch exotherme Reaktionen zu Veränderungen im Kontakt, was die Temperaturverteilung im Kontakt beeinflusst. Daher bietet die Charakterisierung durch z.B. Hochgeschwindigkeits-Thermografie die Möglichkeit, Vorgänge im tribologischen Kontakt zu untersuchen. Am Beispiel des Systems Kupplung wurden bereits Thermografieun-

tersuchungen durchgeführt. Dabei konnte die Annahme, dass im Kontakt eine inhomogene Temperaturverteilung vorliegt, bestätigt werden¹⁷⁷.

Die Nutzung modernster Thermografie-Kameras, die sich unter anderem durch eine sehr geringe Integrationszeit auszeichnen, ermöglicht die Beobachtung lokaler, sich sehr schnell ändernder Temperaturverteilungen. Damit lassen sich genauere Aussagen bezüglich der im Hinblick auf das Systemverhalten wichtigen lokalen Reibereignisse ableiten, indem die lokalen Hotspots durch die Kamera aufgespürt werden können.

Ein weiteres Messsystem, bei welchem die Temperatur als Indikator für die Phänomene im Reibkontakt verwendet wird, ist das Reibintensitätsmesssystem (RIM) nach SEVERIN UND MUSIOL¹⁷⁸.

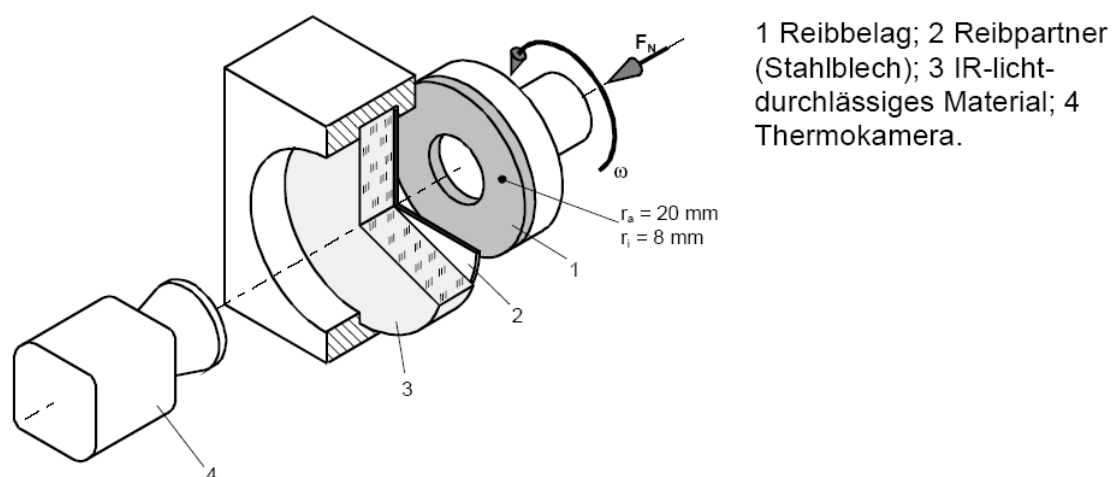


Abbildung 2.20: Prinzipieller Aufbau eines Reibintensitätsmesssystems (RIM)¹⁷⁹

Der kreisförmige rotierende Reibbelag 1 in Abbildung 2.20 gleitet auf einer feststehenden metallischen Reibscheibe 2. Die Reibscheibe stützt sich gegen einen Körper 3, der aufgrund seines großen Transmissionsgrades für Wärmestrahlung die Beobachtung der lokalen Temperaturveränderungen auf der Rückseite der Reibscheibe mit Hilfe einer Thermokamera 4 erlaubt. Wegen der relativ kleinen Dicke (0,1 mm) der Reibscheibe 2 entspricht das gemessene Temperaturfeld annähernd dem Temperaturfeld in der eigentlichen Reibzone. Die globale thermische Belastung lässt sich durch Veränderung der Anpresskraft und der Drehgeschwindigkeit verstellen.

¹⁷⁷ (ALBERS u. a., 2011d)

¹⁷⁸ (SEVERIN & MUSIOL, 1995)

¹⁷⁹ (SEVERIN & MUSIOL, 1995)

Damit ist es möglich, den Einflussfaktor „Temperatur“ und deren Ursache „Reibung“ und dessen Ergebnis „Verschleiß“ in gegenseitiger Abhängigkeit qualitativ zu untersuchen und darzustellen.

Schallemissionsanalyse

Bei der Schallemissionsanalyse wird der Sensor auf der Rückseite von einem der Reibpartner aufgebracht. Bisher fanden die Untersuchungen alle an Stift-Scheibe-Tribometern¹⁸⁰ statt. Somit wurde der Sensor entweder auf der Rückseite des Stiftes oder auf der Gegenreibe in Höhe der Laufbahn des Stiftes befestigt.

Die Abtastung der Körperschallfrequenzen lag bei den bisherigen Arbeiten bei 50 kHz bis 2 Mhz¹⁸¹. Das resultiert daraus, dass in höheren Frequenzbereichen als dem hörbaren Schallbereich mit geringeren Störgeräuschen aus anderen Prozessen zu rechnen ist. Die Erfassung der Signale und das Auslesen der Signal-Parameter können entweder im Zeitbereich oder im Frequenzbereich erfolgen. Eine Auswertung im Frequenzbereich wurde in der Vergangenheit in der Regel nicht betrieben, da hier die zeitliche Auflösung naturgegeben nicht so gut ist. Bisherige Untersuchungen benutzen deshalb hauptsächlich den Zeitbereich zur Analytik. Ausgenommen davon sind Untersuchungen bei Verbundwerkstoffen, bei denen im Frequenzbereich geforscht wurde. Im Folgenden soll auf die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse auf diesem Gebiet eingegangen werden.

In Abbildung 2.21 ist eine schematische Darstellung eines Körperschallsignals zu sehen. Dabei ist zu erkennen, dass sich im Signal verschiedene Niveaus und Charakteristika feststellen lassen.

¹⁸⁰ Erklärung Stift-Scheibe-Tribometer: z.B. (KANANI, 2006)

¹⁸¹ (HANCHI & KLAMECKI, 1991a)

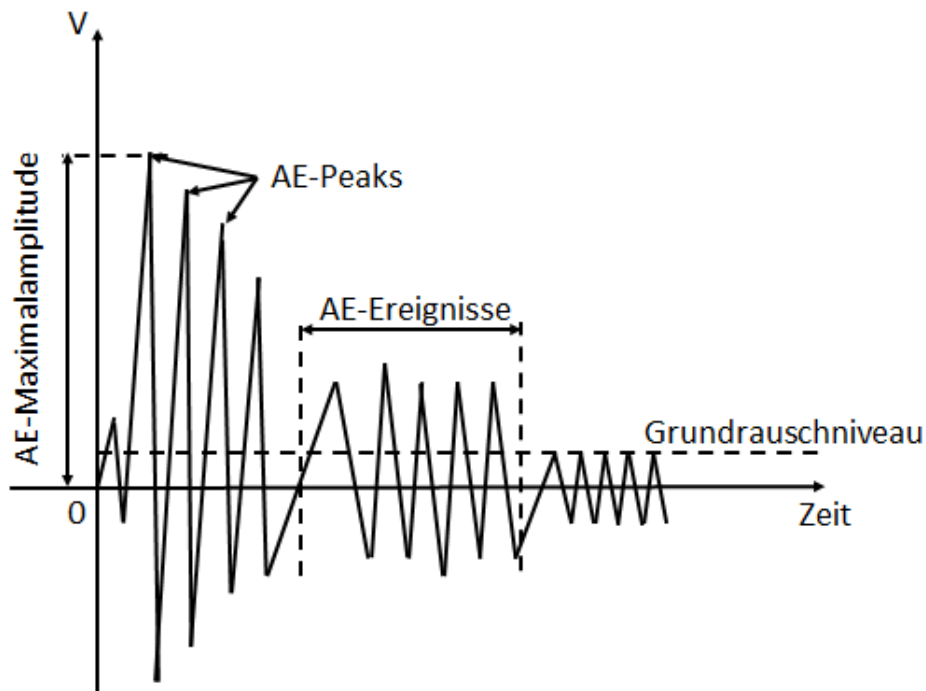


Abbildung 2.21: Schematische Darstellung des Körperschallsignals in seiner typischen Form und die Definition von Bereichen.¹⁸²

Gemessene Signalparameter im Zeitbereich beinhalten sogenannte¹⁸³ :

- **AE-Ereignisse**¹⁸⁴, die als detektiertes AE Signal definiert werden;
- **AE Peaks**¹⁸⁵, oder die Anzahl der Male, wenn eine akustische Emission ein vorhandenes Grundrauschen übersteigt;
- **AE Zählrate**¹⁸⁶, Anzahl der Peaks/Ereignisse pro Sekunde;
- **AE Maximalamplitude**¹⁸⁷, oder die größte vorkommende Signalamplitude in der Wellenfront;
- **AE Energie**, deklariert als die elektrische Energie in einem AE Signal, die von einer AE Quelle emittiert wird.

¹⁸² nach (HANCHI & KLAMECKI, 1991a)

¹⁸³ (HANCHI & KLAMECKI, 1991a)

¹⁸⁴ Im Englischen als AE-Events gekennzeichnet

¹⁸⁵ Im Englischen als AE-Counts gekennzeichnet

¹⁸⁶ Im Englischen als AE-Count rate, bzw. time rate wird hier als Zeitrage übersetzt.

¹⁸⁷ Im Englischen als peak amplitude gekennzeichnet

JIAA und DORNFELD beschreiben mit Hilfe von Versuchen am Stift-Scheibe-Tribometer, dass in einem Bereich von 50 kHz bis 2 Mhz, sich gezeigt hat, dass man mit Körperschall Reibungs- und Verschleißprozesse detektieren kann¹⁸⁸.

Es konnte jedoch bereits gezeigt werden, dass die freiwerdende Energie während des Reibvorgangs hauptsächlich zwischen einem Bereich von 100 kHz und 500 kHz des Körperschallsignals wiedergegeben wird¹⁸⁹ unabhängig von der Materialpaarung im Wirkflächenpaar.

Zur Aussagefähigkeit eines Signals im Zeitbereich wird vor allem neben der Amplitude, die Anzahl der Ereignisse bzw. Peaks pro Sekunde herangezogen. Dabei wird zunächst das Grundrauschen definiert, das von umgebenden Elektromotoren oder anderen Störeinflüssen auf den Sensor wirkt, ohne dass das zu untersuchende tribologische System bereits aktiv ist. Ist das Signal stärker als dieses Grundrauschen, wird dies den Partikeln im Reibkontakt zugeschrieben, die sogenannten Transferpartikel, die sich in den AE-Ereignissen zeigen¹⁹⁰. Diese Partikel bewegen sich zwischen den zwei gegeneinander reibenden Oberflächen. Die Amplitude bewegt sich hierbei in einem mittleren Niveau des Amplitudenspektrums¹⁹¹. Auslöser sind neben diesen Transferpartikeln auch plastische Deformationen und Risse in der Oberfläche. Die Anzahl der Peaks stehen für Verschleißpartikel, die die Oberfläche und damit den aktiven Reibkontakt verlassen und die dabei frei werdende gespeicherte elastische Energie freisetzen. Es ist nicht genau definiert, wo die einzelnen Energieniveaus liegen, bzw. wie sie zu bestimmen sind. Jeder Wissenschaftler muss diese in Abhängigkeit der Randbedingungen selbst wählen¹⁹².

Schallemissionsanalyse bei metallischen tribologischen Systemen

Die Einsatzfähigkeit der Körperschallüberwachung für die Forschung und bei der Überwachung von Friktionspaarungen wurde schon von dem Moscow Engineering Physics Institute in den 80er und 90er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts beschrieben. Das damalige Anwendungsgebiet war hauptsächlich beschränkt auf die Überwachung von tribologischen Systemen, die in Kernkraftreaktoren zum Einsatz kamen¹⁹³. Hierbei wurde die Schallemissionsanalyse eingesetzt, da andere

¹⁸⁸ (JIAA & DORNFELD, 1990)

¹⁸⁹ (MECHEFSKE u. a., 2002)

¹⁹⁰ (HASE u. a., 2009)

¹⁹¹ Mittel ist undefiniert. Die Grenzen zwischen niedrig, mittel und hoch, bzw. Grundrauschen, Höhe der Amplituden der AE-Ereignisse und der AE-Peaks werden von den Wissenschaftler in Abhängigkeit der Randbedingungen gezogen und können sich im Laufe des Reibprozesses oder je nach Material stark ändern.

¹⁹² (HASE u. a., 2009)

¹⁹³ (SARYCHEV & SHCHAVELIN, 1991)

Verfahren zur Überwachung aufgrund der aggressiven Medien, Temperaturen oder der Radioaktivität ausschieden. Die Forschungen waren damals damit vorrangig auf Materialpaarungen beschränkt, die in den Reaktoren zum Einsatz kamen, und überwacht werden mussten. Die Aussagefähigkeit bei der Analyse tribologischer Prozesse wurde vorhergehend von zahlreichen Quellen in Grundlagenuntersuchungen bestätigt.¹⁹⁴ SAYCHEV U.A. stellten in Ihren Untersuchungen fest, dass die AE-Ereignisse wesentlich empfindlicher auf tribologische Einflüsse reagieren als der Reibkoeffizient¹⁹⁵.

Alle Untersuchungen in diesem Gebiet wurden an Stift-Scheibe-Prüfständen (wie z.B. in Abbildung 2.22 dargestellt) durchgeführt. Durch den Aufbau des Prüfstandes gab es drei grundlegende Parametervariationen zur Beeinflussung des Schallsignals: Die Anpresskraft bzw. Normalkraft des Stifts auf der Scheibe, die Geschwindigkeit des Stifts bzw. der Scheibe und das verwendete Material bzw. die Oberfläche.

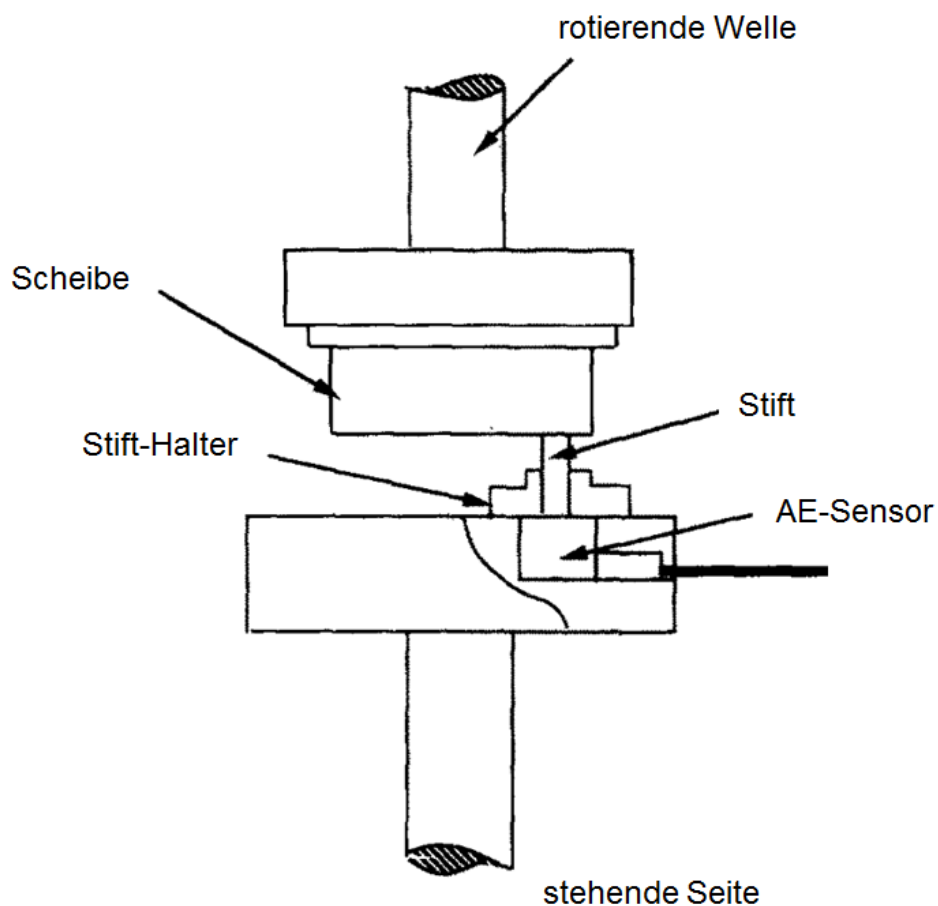


Abbildung 2.22: Stift-Scheibe-Tribometer¹⁹⁶

¹⁹⁴ (BARANOV, 2007)

¹⁹⁵ (SARYCHEV & SHCHAVELIN, 1991)

¹⁹⁶ (HANCHI & KLAMECKI, 1991)

Betrachtet man die einzelnen Einflüsse nacheinander, dann kann man folgende Erkenntnisse aus den bisherigen Untersuchungen zusammenfassen:

Unter Lastvariationen, also bei unterschiedlicher Anpresskraft, wurde von BELYI U.A.¹⁹⁷ und SIRIDENKO U.A. beobachtet, dass die AE Peakanzahl pro Sekunde mit dem Übergang von adhäsivem Verschleiß zu abrasivem Verschleiß zunimmt. BELYI U.A. stellten auch fest, dass die Intensität des Schallsignals für alle Materialien wächst, wenn adhäsiver und Ermüdungsmoden von Verschleiß in abrasiven Modus wechselt. KLAMECKI U.A.¹⁹⁸ bestätigen in ihrer Arbeit die Aussagen, dass durch Partikelform und aus der Kombination hoher Amplituden und Peakvariationen verschiedene Verschleißformen unterscheidbar sind. HANCHI U.A. ergänzten, dass Effekte wie Oberflächenzerrütung erfasst werden können¹⁹⁹.

SARYCHEV U.A.²⁰⁰ erweiterten 1985 die These, indem Sie in ihren Experimenten feststellten, dass die Peakanzahl pro Sekunde mit der steigenden Last anwächst. KLAMECKI U.A.²⁰¹ stellen in Ihren Untersuchungen zudem fest, dass die Anzahl der Peaks und Ereignisse, die Maximalamplituden, und die Verschleißrate mit der Belastung steigen und es somit hier eine Korrelation geben muss. Eine Erklärung hierfür ist, dass durch den verstärkten Druck mehr Verschleiß generiert wird. Diese erhöhte Verschleißrate muss mehr Verschleißpartikel aus der Oberfläche zur Folge haben. Dies liegt daran, dass es zu mehreren Brüchen im Material, die dann in Summe zu stärkerer Materialauslösung führen, kommt. Diese Brüche und damit mehr Verschleißpartikel führen zu mehr Peaks und in Summe damit auch zu höheren Energiewerten. BELYI U.A.²⁰² fest, dass mit der Verschleißrate auch die AE Energie steigt.

KLAMECKI UND HANCHI beobachteten jedoch auch eine Abnahme der Peakanzahl über der Zeit bei größerer Last, mehr Verschleiß und größerer Schallenergie. Dies erklärten sie damit, dass es durch die erhöhte Last, wie bereits beschrieben, zu mehr Brüchen kommt, die Anzahl der Partikel jedoch abnimmt, weil die Partikel in Summe größer werden, wie in Abbildung 2.23 zu sehen ist.

¹⁹⁷ (BELYI u. a., 1981)

¹⁹⁸ (KLAMECKI & HANCHI, 1990)

¹⁹⁹ (HANCHI & KLAMECKI, 1991a)

²⁰⁰ (SARYCHEV & SHCHAVELIN, 1991)

²⁰¹ (KLAMECKI & HANCHI, 1990)

²⁰² (BELYI u. a., 1981)

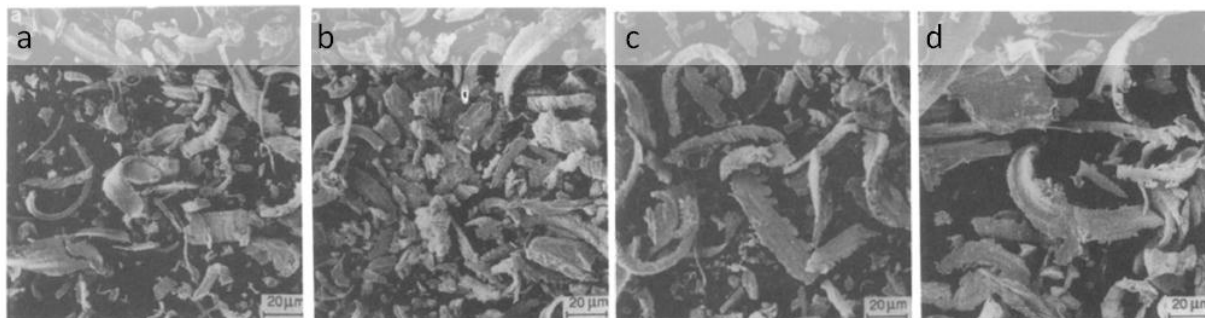


Abbildung 2.23: Verschleißpartikel von Baustahl während Reibversuchen. Die Last steigt von a) 22N b) 27N c) 36N d) 45N bei konst. Gleitgeschwindigkeit von 0,5m/s.²⁰³

Diese These wurde von FILATOV²⁰⁴ unterstützt. Seine Untersuchungen ergaben, dass die Peakanzahl von der Verschleißpartikeloberflächengröße abhängt. In Anlehnung an die Charakterisierung verschiedener Verschleißmechanismen kann man diese Zustände dadurch erkennen. Jeder Verschleißmechanismus produziert typische Verschleißpartikel in typischen Größen. Somit lassen sich die Verschleißmechanismen ebenfalls durch das Körperschallsignal trennen.

Der Einfluss der Geschwindigkeit auf das Schallsignal wurde von KLAMECKI U.A. 1990 untersucht. Sie stellten fest, dass mit steigender Geschwindigkeit die Anzahl großer Amplituden steigt und die Verschleißrate gleichzeitig sinkt. Eine Erklärung ist die steigende Anzahl von AE-Ereignissen, die nicht auf Brüche und Verschleiß, sondern auf plastische Verformungen zurückzuführen sind. Bei größeren Geschwindigkeiten werden auch größere Partikel erzeugt, zu deren Erzeugung stärkere plastische Verformung und Brüche nötig sind als für kleine Partikel²⁰⁵.

Materialmerkmale wie Härte und Dichte bestimmen die Charakteristiken des Körperschallsignals, wie Frequenz, Amplitude, Länge, Anschwill- und Abklingrate.

NOSOVSKII U.A. stellten einen Zusammenhang zwischen der realen belasteten Kontaktfläche und der Peakanzahl pro Sekunde her. Sie stellten in Untersuchungen fest, dass sich mit größer werdender Kontaktfläche die Anzahl der Überschwingungen erhöht. BELYI U.A. kamen zur Erkenntnis, dass die Variation der AE Intensität von den Bereichen in den realen Kontakten beeinflusst wird²⁰⁶.

²⁰³ (KLAMECKI & HANCHI, 1990)

²⁰⁴ (FILATOV, 1982)

²⁰⁵ (KLAMECKI & HANCHI, 1990)

²⁰⁶ (BELYI u. a., 1981)

BRAGINSKII U.A. stellten schließlich den Zusammenhang her zwischen plastischer Verformung, Brüchen und dem AE Signal. Bestimmte Peaks wurden Brüchen zugeordnet, während die flachen Regionen plastische Deformationen darstellten.

BELI U.A.²⁰⁷ konnten zeigen, dass die AE Intensität für einen bestimmten Verschleißmodus bei härteren Materialien, größerer Anisotropie und Inhomogenität der Struktur höher ist.

HANCHI U.A. konnten Effekte wie Oberflächenzerrütung erfassen²⁰⁸.

HASE U.A.²⁰⁹ stellt ferner fest, dass die Variation der Peakanzahl proportional zur Summe der Oberflächenrauigkeiten zweier reibender Flächen ist.

HASE U.A. beschreibt ferner, dass sich mit Hilfe der Körperschallanalyse Oxide detektieren lassen. Oxide lassen sich im Körperschallsignal vom reinen Material unterscheiden, da dieses auf Grund seiner größeren Härte und Porosität ein energiereicheres Schallsignal erzeugt. Dadurch, dass sich an den Bruchkanten des Metalls sofort Oxide bilden, ist es für den Partikel nicht möglich zu wachsen, wie es z.B. bei einem Werkstoff der Fall ist, der nicht oder nicht so stark oxidiert. Somit lassen sich Oxide und nicht Oxide eines Werkstoffes in der Anzahl der Peaks unterscheiden. Oxidiert der Werkstoff, äußert sich dies durch eine größere Peakanzahl, als wenn er nicht oxidiert, da hierbei mehr Partikel erzeugt werden.

JHA U.A.²¹⁰ belegen in Ihren Untersuchungen diese Erkenntnis und kommen zur gleichen Differenzierung im Schallsignal.

Schallemissionsanalyse bei Faserverbundwerkstoffen

Auf Grund des Einsatzgebietes von Faserverbundwerkstoffen in der Luft- und Raumfahrtindustrie oder anderen Industriezweigen, die sich mit dem Thema Leichtbau auseinandersetzen, wurden die Verbundwerkstoffe hauptsächlich auf Zug und Biegung beansprucht und dabei der Bruch und das Reißen von Verbundwerkstoffen mit Hilfe von Körperschall untersucht.

Untersuchungen, in denen gezielt Beläge für Kupplungen oder Bremsen aus Verbundwerkstoffen untersucht wurden sind nicht bekannt.

Bei der Schallemissionsanalyse von Bruchvorgängen in Faserverbundwerkstoffen wurden bei den Analysen vier Versagensmechanismen unterschieden:

²⁰⁷ (BELI u. a., 1981)

²⁰⁸ (HANCHI & KLAMECKI, 1991a)

²⁰⁹ (HASE u. a., 2008a)

²¹⁰ (JHA u. a., 1991a); (JHA u. a., 2009a); (JHA u. a., 2009b)

- Faserbruch
- Matrixreißen
- Ablösen zwischen Faser und Matrix
- Faserherauszug aus der Matrix

Eine ausführliche Darstellung und Aufzählung der gewonnenen Ergebnisse ist auf Grund der Vielzahl der verwendeten Verbundwerkstoffe sehr unübersichtlich. In Abbildung 2.24 und Abbildung 2.25 wird daher ein Überblick über relevante Arbeiten der letzten Jahre gegeben, um die Ergebnisse zu bündeln.

In dieser Darstellung sind die Versagensmechanismen bei unterschiedlichen Verbundwerkstoffen den Energieinhalten und Frequenzen zugeordnet, so wie sie in den Arbeiten bei Zug- und Biegeversuchen festgehalten wurden. Auffallend ist hierbei, dass sich bestimmte Versagensmechanismen unabhängig von der Zusammensetzung des Verbundwerkstoffes vorwiegend in bestimmten Frequenzbereichen abspielen.

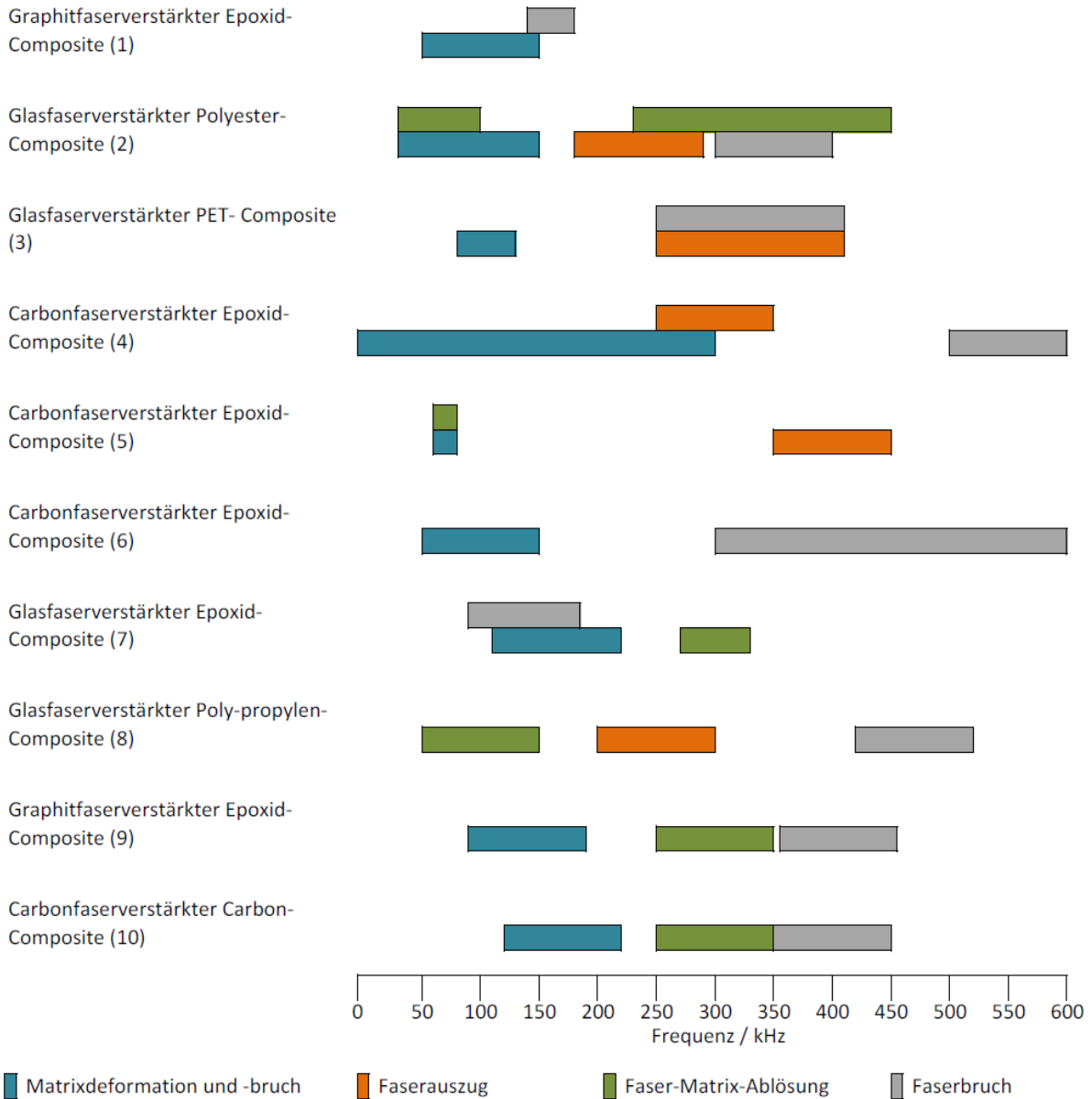


Abbildung 2.24: Überblick über die Beziehung zwischen Versagensarten und die Zuordnung zu Frequenzen wie in der Literatur beschrieben.²¹¹

KUMOSA U.A.²¹² stellten 1987 die These auf, dass niedrige Amplituden eher in Verbindung mit Matrixversagen stehen und hohe Amplituden mit Faserbrüchen in Verbindung zu bringen sind, unabhängig vom betrachteten Werkstoff. Insbesondere Matrixdeformation und -bruch (Frequenzbereich bis 200 kHz, Amplitude bis 60dB)

²¹¹ Nach (DE GROOT u. a., 1995) und erweitert: Quellen zur Tabelle sind (1)(RUSSELL & HENNEKE, 1977); (2)(SUZUKI u. a., 1989); (3) (SUZUKI u. a., 1991); (4)(KOMAI u. a., 1991); (5)(SUH u. a., 1992); (6)(GROßE, 1996); (7)(HASELBACH & LAUKE, 2003); (8)(RAMIREZ-JIMENEZ u. a., 2004); (9)(BUSSIBA u. a., 2008); (10) (BUSSIBA u. a., 2008)

²¹² (KUMOSA, 1987)

und der Faserbruch (Frequenzbereich ab ca. 250 kHz, Amplitude bis 120dB) lassen sich sehr gut voneinander unterscheiden.

Bei Zug- und Biegeversuchen stellten GROOT u.a. fest, dass die intermittierenden Frequenzen durch Herausziehen und Ablösen Anlass zu verschiedenen Interpretationen geben und sich nicht klar auftrennen lassen²¹³.

Daher lassen sich Faserauszug und Matrix-Faserablösung im Gegensatz zu Matrixdeformation und -bruch, sowie Faserbruch im Körperschallsignal nicht klar zuordnen und variieren je nach Verbundwerkstoffzusammensetzung sehr stark. Die Versagensmechanismen lassen sich hier nicht klar über die Verbundwerkstoffe hinweg clustern.

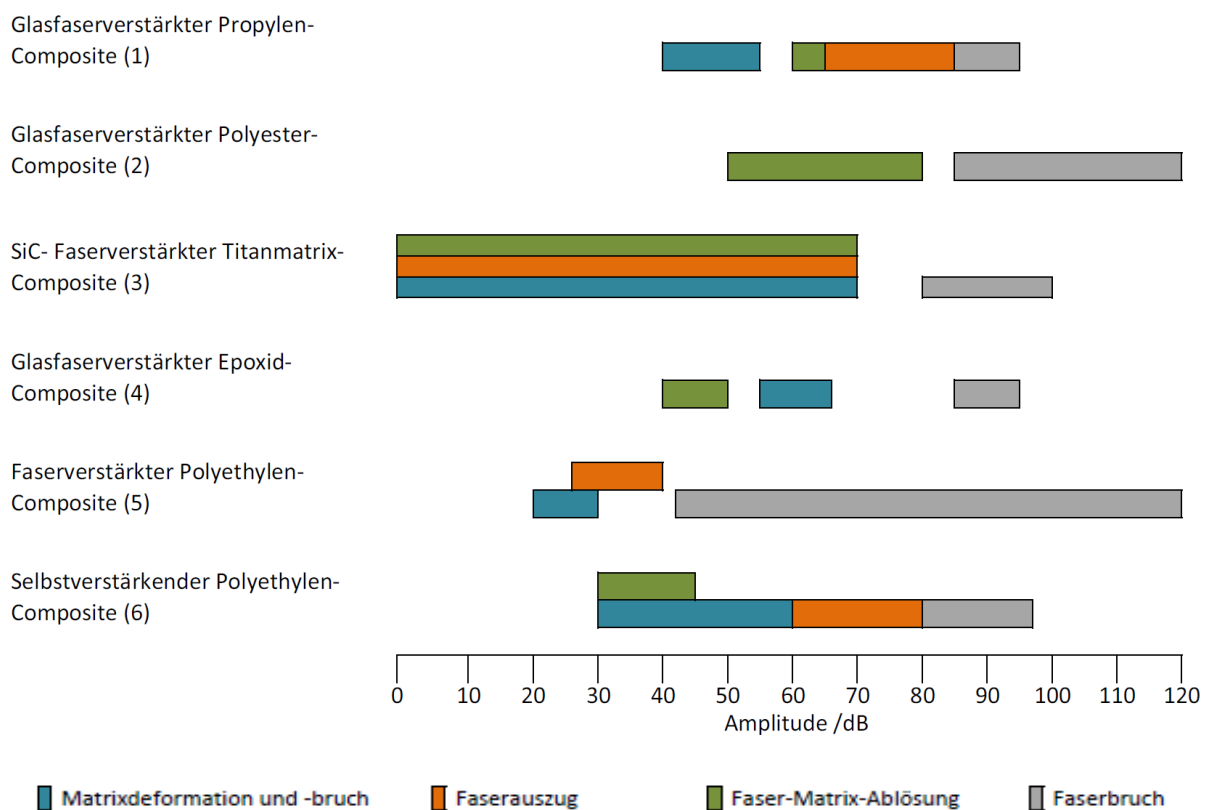


Abbildung 2.25: Überblick über Beziehungen zwischen Versagensarten und die Zuordnung zu Energieinhalten wie in der Literatur beschrieben.²¹⁴

Neben den genannten Untersuchungen wurden noch andere Zusammenhänge untersucht, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

²¹³ (DE GROOT u. a., 1995)

²¹⁴ Nach (DE GROOT u. a., 1995) und erweitert: Quellen zur Tabelle sind (1) (BARRÉ & BENZEGGAGH, 1994); (2) (KOTSIKOS u. a., 2000); (3) (FANG u. a., 2000); (4) (HASELBACH & LAUKE, 2003); (5) (DOGOSSY & CZIGÁNY, 2006); (6) (ZHUANG & YAN, 2006);

NI UND JINEN²¹⁵ stellten bei Einzelfaser Verbundwerkstoffen fest, dass vor allem Fasern, die an der Oberfläche in der Nähe der Sensoren versagen von dem Sensor erfasst werden und dass hierbei eine gute Korrelation besteht zwischen der Anzahl der Brüchen und der Anzahl der Peaks pro Sekunde.

Des weiteren stellten OKOROAFOR UND HILL²¹⁶ in Ihren Untersuchungen von Polymer-Verbundwerkstoffen mit Fasern fest, dass bei steigendem Druck und bei vermehrtem Bruch von Fasern und damit dem steigendem Versagen des Verbundwerkstoffes auch die Anzahl der Peaks pro Sekunde steigen, die proportional zur Belastung laufen.

BELTZER führte Untersuchungen an Verbundwerkstoffen mit unidirektional gerichteten Fasern und ohne Fasern durch²¹⁷. Er beobachtete, dass es beim Auftreffen einer sogenannten horizontal-polarisierten Scherwelle auf die Oberfläche des Prüfkörpers zu Wechselwirkungen zwischen Matrix und verstärkender Phase kommt. BELTZER erklärt in seinem Modell, dass es durch diese Wechselwirkungen zu einem "Effekt multipler Zerstreuung", einen Dämpfungseffekt faserverstärkter Verbundwerkstoffe, kommt. Das Amplitudenmaximum wird im Vergleich zur Schallausbreitung bei Verbundwerkstoffen ohne Fasern geschwächt und verlagert sich hin zu einem höheren Frequenzlevel. Dieser "Effekt multipler Zerstreuung" kann sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Frequenzen auftreten. Das Phänomen ist in Abbildung 2.26 zu sehen, welche den Signalverlauf in Bor-Aluminium-Verbundwerkstoffen mit und ohne darstellt.

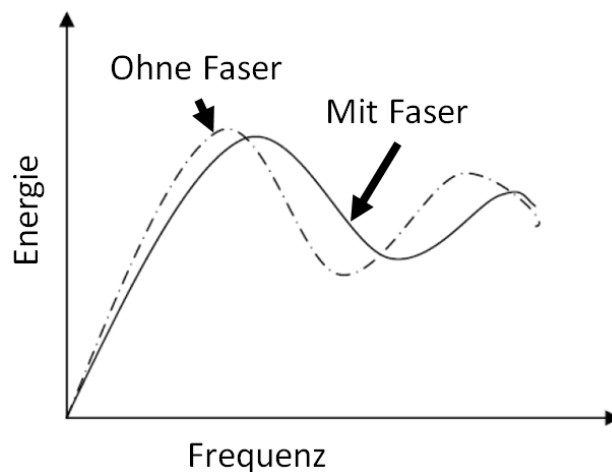


Abbildung 2.26: Signalverlauf in Bor-Aluminium-Verbundwerkstoffen mit und ohne Fasern²¹⁸

²¹⁵ (NI & JINEN, 1997)

²¹⁶ (OKOROAFOR & HILL, 1995)

²¹⁷ (BELTZER, 1988)

²¹⁸ (BELTZER, 1988)

BELTZER stellte ferner fest, dass auf diesen Dämpfungseffekt die Materialeigenschaften keinerlei Auswirkungen haben, sondern allein Einlagerungen im Werkstoff zur Bildung solcher Störfelder führen.

3 Zielsetzung

Die Neuentwicklung von Fahrzeugen geschieht in immer kürzeren Zeitintervallen. Von den Fahrzeugen wird ein immer höherer Fahrkomfort gefordert, die Motorenleistung und die Leistungsdichte steigt kontinuierlich an (siehe Abbildung 3.1). Gleichzeitig wird der Bauraum für einzelne Teilsysteme immer kleiner und aus Umweltaspekten rückt das Thema Leichtbau inzwischen über alle Fahrzeugklassen hinweg immer stärker in den Entwicklungsfokus. Diese Aspekte betreffen auch den Antriebsstrang und damit die Bremsen und die Kupplungen als Teilsysteme.

Jahr	Durchschnittlicher Hubraum in cm ³	Durchschnittliche Motorleistung in kW	Durchschnittliche Höchstgeschwindigkeit in km/h	Durchschnittliches Leergewicht in kg	Verhältnis *) kW/100 kg
2001	1.849,0	83,6	186,7	1.331,3	6,3
2002	1.855,4	85,3	187,7	1.353,0	6,3
2003	1.853,6	87,1	188,5	1.381,2	6,3
2004	1.865,5	89,5	189,4	1.408,1	6,4
2005	1.856,0	90,7	189,1	1.426,2	6,4
2006	1.859,9	93,1	190,1	1.435,8	6,5
2007	1.870,0	95,9	191,4	1.445,4	6,6
2008	1.842,0	96,4	191,8	1.439,0	6,7
2009	1.669,5	86,8	186,0	1.296,9	6,7
2010	1.763,1	96,1	191,7	1.445,8	6,6

*) Beispiel: $80 \text{ kW} \times 100 : 1400 \text{ kg} = 5,7$.

Abbildung 3.1: Neuzulassungen von Personenkraftwagen in den Jahren 2001-2010 nach technischen Merkmalen²¹⁹

Für die Reibbelagsentwicklung bedeutet dies eine große Herausforderung. Die Reibbeläge müssen die immer größeren Leistungen im Antriebsstrang aufnehmen und übertragen können und gleichzeitig werden unter anderem aus Gewichtsgründen neue Materialkombinationen eingesetzt. Ein Feld intensiver Entwicklung und Anpassung ist dabei die Verschleißfestigkeit, Temperaturbeständigkeit und die Geräuschvermeidung, die von selbsterregten Reibschwingungen verursacht wird. Speziell bei kohlenstoffaserverstärkten Reibbelägen müssen zudem die Alterungsbeständigkeit und die Erweichungstemperatur der Matrix möglichst hoch sein.

²¹⁹ (KBA, 2011) Der Knick in 2009 ist auf das Konjunkturpaket II der Bundesregierung zurückzuführen, das Neuzulassungen vor allem von Kleinwagen subventionierte.

Neue Beläge entfalten ihre volle Leistung erst nach einer gewissen Einbauzeit. Während dieser Phase gleichen sich die Belagsoberflächen einander an, bis sich ein gleichmäßiges Tragbild entwickelt. Innerhalb dieser Phase verändert sich auch das Material an der Kontaktfläche. Erst nach diesem Einlaufprozess kann das Kupplungssystem oder das Bremssystem im vollem Umfang arbeiten.

Ein Verständnis der tribologischen Zusammenhänge ist bis heute nicht umfassend vorhanden. Vor allem fehlt es an Online-Analysemöglichkeiten, die ohne das bestehende trockenlaufende Friktionssystem zu verändern, direkt Vorgänge im Wirkflächenpaar, wie Verschleiß und tatsächlichen Traganteil im Funktionskontakt, erfassen können.

Eine einzigartige Möglichkeit bietet hier die Analyse von Schwingungen und Körperschallemissionen, als Produkt der Gleitbewegung zweier Körper. In der industriellen Praxis stellen diese Verfahren heute die Standardverfahren zur Überwachung von Wälzlagern und Verzahnungen beispielsweise in der Getriebediagnose dar. Wobei hier nicht die vollständige Analytik, wie sie in den Ergebnissen in Kapitel 2.7.2 beschrieben, ausgenutzt wird. Heutzutage wird im industriellen Umfeld, wie z.B. bei der Maschinen- und Prozessüberwachung, größtenteils Körperschallanalytik nur in dem Maße betrieben, dass beim Überschreiten eines bestimmten „Lärmpegels“ eine Warnung herausgegeben wird, ohne diese genauer zu quantifizieren. Doch gerade bei den Entwicklungen von Reibbelägen, könnte sie als hilfreiches Validierungswerkzeug eingesetzt werden, um tribologische Effekte und Phänomene zu untersuchen und letztlich Verbesserungen durchzuführen.

Hier hat die Körperschallanalytik im Frequenzbereich des Ultraschalls das Potential, andere deutlich aufwendigere und teurere Verfahren zu ergänzen oder gar zu ersetzen.

Der Nachweis der Leistungsfähigkeit an trockenlaufenden Friktionssystemen fand bisher ausschließlich auf unterster Ebene der tribologischen Kette an Stift-Scheibe-Tribometern statt. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf höhere Prüfebene der tribologischen Kette sind nicht bekannt. Zudem gab es bisher keinerlei Validierung mit anderen für den Trockenlauf geeigneten Onlinemessverfahren.

Es stellt sich die Frage, ob es, laut Literatur nötig ist, den gesamten Frequenzbereich bis zu mehreren Megahertz zu untersuchen, um Aussagen über Verschleiß, Partikelanzahl und Partikelgröße zu erhalten. Die Potentiale hinsichtlich dieser Herausforderung, insbesondere der Frequenztrennung der relevanten Signalanteile im aufgenommenen Körperschallsignal bedürfen eingehender Untersuchung. Sollte es hier zu einer Einschränkung auf wenige relevante Frequenzbereiche kommen, würde das die zeitlich zu erfassenden Datenmengen erheblich reduzieren und damit

die Kosten für einen späteren Einsatz in der Industrie oder Forschung weiter reduzieren.

Es ist zu vermuten, dass der weiteren Verbreitung von Körperschallemissionsanalyseverfahren heute aus technischer Sicht nicht mehr – wie noch vor Jahrzehnten – periphere Gründe wie die für intensive Signalanalyse benötigte Rechenleistung oder der Speicherbedarf der gewonnenen Messwerte entgegenstehen, sondern dass vielmehr mangelndes Vertrauen in die Leistungsfähigkeit der zugrunde liegenden Methoden eine Ursache hierfür sind.

Diese Arbeit soll Wissenslücken im Stand der Forschung schließen und gleichzeitig aufzeigen, dass die Körperschallanalytik vorhandene Analyseverfahren in der Industrie kostenreduzierend ersetzen kann.

Aus dem genannten ergibt sich zusammenfassend folgende Forschungshypothese, mit den dazugehörigen verifizierenden Forschungsfragen.

Forschungshypothese

Es ist möglich mit der Körperschallanalyse online verschiedenartige tribologisch induzierte Phänomene (Partikelgröße, Verschleißvolumen, Reibmoment, Traganteil) bei trockenlaufenden Friktionssystemen zu erfassen und zu differenzieren.

In dieser Arbeit soll dies am trockenlaufenden tribologischen System organischer Reibbelag/Gegenreibe, wie es Einsatz in trockenlaufenden Kupplungen findet, geschehen. Dazu sind folgende Forschungsfragen zu klären.

Forschungsfragen:

- Kann am Tribosystem Reibbelag/Gegenreibe die Übertragbarkeit der bisherigen Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung aus Kapitel 2.7.2 an Stift-Scheibe-Tribometern (Stufe VI) auf der nächsten Stufe (Stufe V) der tribologischen Prüfkette nachgewiesen werden?
- Von welchen Werkstoffeigenschaften der Reibpartner ist das Körperschallsignal abhängig?
- Können die Ergebnisse von Körperschallmessungen an metallischen Reibbelägen auf organische Reibbeläge übertragen werden?
- Sind die bisher gewonnen Erkenntnisse aus der Literatur über Körperschallanalysen bei Zug-, und Biegeversuchen an Verbundwerkstoffen auf Reibversuche mit Verbundwerkstoffen übertragbar?
- Lassen sich im Körperschallsignal für tribologische Effekte wie Verschleiß, Traganteil und die Auswirkungen von Belastungskollektiven auf den Tribokontakt unterschiedliche Frequenzbänder identifizieren?

- Wie ist die Aussagefähigkeit der Körperschallanalyse bei der Verschleißquantifizierung und der Traganteilmessung im Vergleich zu etablierten Onlinemessverfahren einzuordnen?

4 Verwendete Handlungssysteme

Durch eine geeignete Versuchsmethode können die verschiedenartigen Einflüsse aus Friktionskontakt und Anschlusskonstruktion auf die Entstehung von Reibschwingungen untersucht werden. In Anlehnung an die tribologische Prüfkette werden Untersuchungen auf Modellebene an zwei Prüfständen durchgeführt.

Am Trockenreibmodellprüfstand 1.0 (TRM 1.0), der in die Prüfkategorie V eingeordnet wird, können Friktionswerkstoffe auf Modellebene als Teilbeläge untersucht werden.

Der Trockenreibmodellprüfstand 2.0 (TRM 2.0) wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes mit der Firma IAVF GmbH Karlsruhe am IPEK entwickelt und dient dazu, Onlineverschleißuntersuchungen mit Hilfe der RNT durchzuführen. Im Folgenden werden die verwendeten Werkstoffe, Prüfstände und die verwendete Messtechnik vorgestellt.

4.1 Eingesetzte Werkstoffe

4.1.1 Metalle

Zunächst kamen Metalle zum Einsatz, um die Ergebnisse aus dem Stand der Forschung mit eigenen Ergebnissen vergleichen zu können.

Dabei wurden die Metalle Kupfer, Baustahl (S235JR), Aluminium, Messing und Grauguss (GG25/EN-GJL-250) verwendet. Die jeweiligen werkstoffspezifischen Kenndaten der Metalle sind auszugsweise der Tabelle 4.1 zu entnehmen.

Tabelle 4.1: Werkstofftabelle mit einigen werkstoffspezifischen Kennwerten

	Formelzeichen	Einheit	Kupfer	Aluminium	Grauguss	Baustahl (S235JR)	Messing
Wärmeleitkoeffizient	λ	W/(m*K)	380	160-200	48	50	81 -105
Härte		HB	100	100	220	150	140
Dichte	ρ	kg/m ³	8900	2800	7500	7800	8400
Schallgeschwindigkeit	c	m/s	3570	5100	5600	5920	3500
spez. Wärmekapazität	c_p	kJ/kg*K	0,381	0,896	0,46 -0,54	0,477	0,389
E-Modul	E	kN/mm ²	100 - 130	70	118	210	96
Molare Masse		g/mol	64	27	55	47	64
Gitterstruktur			kfz	kfz	kfz	-	-
Schmelzpunkt	T_s	°C	1084	660	870-1000	1500	900-925

Im Folgenden sind die physikalischen Eigenschaften des Belags aufgelistet, wie sie vom Belagshersteller zur Verfügung gestellt werden.

Tabelle 4.2: Physikalische Eigenschaften Belag B-8402²²²

Physikalische Eigenschaften	Wert	Einheit	Bemerkungen
Dichte	1,88	g/cm ³	bei 20 °C
Wärmeleitfähigkeit	0,53	W/mK	

Verbundwerkstoff R-087 ohne Fasern²²³

Der Belag R-087, ein Teilchenverbundwerkstoff, (siehe Abbildung 4.2) ist ein asbestfreies metallhaltiges elastomer-/kunstharzgebundenes Material. Dieser Verbundwerkstoff besteht laut EDX Analyse unter anderem aus: Amphibole (ohne Eisen), Magnesiumoxid, Quarz, Dolomit, Eisen und organisches Bindematerial. Wie in Abbildung 4.2 zu sehen, ist die Verteilung auch in der Tiefe durchgehend homogen, marmoriert mit den metallischen Einlagerungen.

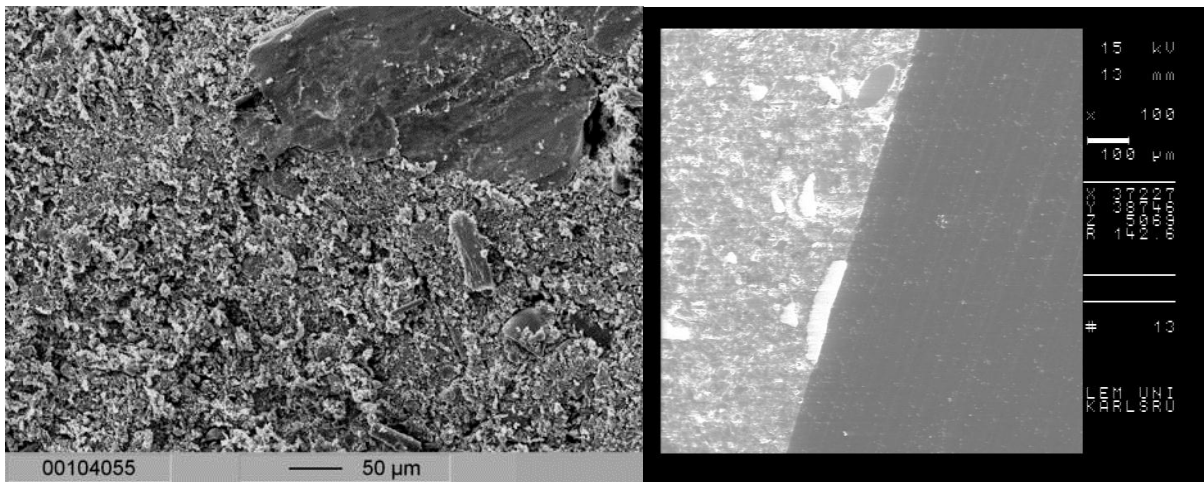


Abbildung 4.2: REM Draufsicht²²⁴ und Schliffbild des Belags

Empfohlenes Einsatzgebiet sind hier Trommelbremsbeläge für Anhänger und Zweiräder, Außenbackenbremsen. Das empfohlene Gegenmaterial ist Grauguss.

Im Folgenden sind die physikalischen Eigenschaften des Belags aufgelistet, sofern sie vom Belagshersteller zur Verfügung gestellt werden.

²²² (LUK, SCHAEFFLER FRICITON PRODUCTS GMBH, 2009a)

²²³ Alle Angaben stammen aus dem entsprechenden veröffentlichten Datenblatt von LuK (LUK, SCHAEFFLER FRICITON PRODUCTS GMBH, 2009b)

²²⁴ LEM KIT

Tabelle 4.3: Physikalische Eigenschaften Belag R-087²²⁵

Physikalische Eigenschaften	Wert	Einheit	Bemerkungen
Dichte	2,15	g/cm ³	bei 20 °C
Wärmeleitfähigkeit	0,84	W/mK	

4.2 Eingesetzte Messtechnik

4.2.1 Zur Körperschallerfassung eingesetzte Messtechnik

Verwendet wurde ein piezoelektrischer Breitband-Körperschallsensor vom Typ 8152B1 der Firma Kistler. Der nutzbare Frequenzbereich reicht von 50 kHz bis 400 kHz, wie dem in Abbildung 4.1 dargestellten Frequenzgang des Sensors zu entnehmen ist. Die Empfindlichkeit ist in Dezibel zu einem Referenzwert von 1V/(m/s) angegeben. Gut erkennbar ist die inhärente Hochpass-Charakteristik des Sensors.

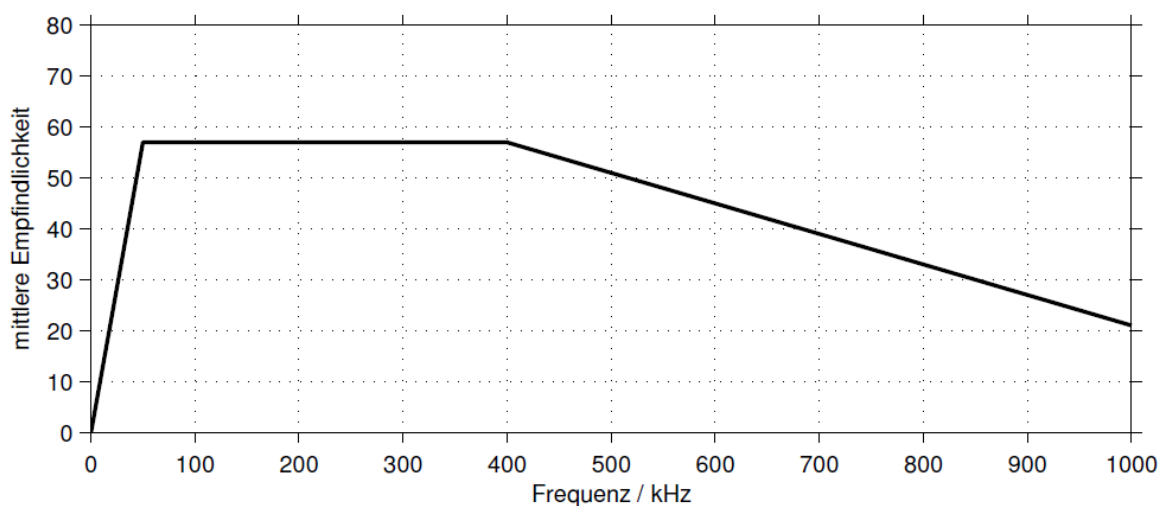


Abbildung 4.3: Frequenzgang Körperschallsensor Kistler 8152B1, mittlere Empfindlichkeit in dB referenziert auf 1V/(m/s)²²⁶

Der Sensor ist das einzige Glied der Messkette, das als mechanisches Schwingsystem funktioniert und folglich Resonanzeigenschaften besitzt, die selbst das Messergebnis stark beeinflussen können. Der hier zum Einsatz kommende Sensor soll deshalb etwas näher betrachtet werden. Wie in der Schnittzeichnung des Sensors in Abbildung 4.4 zu erkennen ist, sitzt das Messelement aus piezoelektrischer Keramik auf einer Stahlmembran, welche im Gehäuse eingeschweißt ist. Die Außenseite der Membran ist Wirkfläche und bildet nach erfolgter Montage an einer

²²⁵ (LUK, SCHAEFFLER FRICITON PRODUCTS GMBH, 2009b)

²²⁶ (KISTLER, 2007)

Struktur mit dieser ein Wirkflächenpaar (WFP Ankopplung). Über dieses werden Schwingungen des Körpers in das System Sensor eingeleitet. Um eine definierte Anpresskraft im WFP Ankopplung sicherzustellen, ist die Membran so gestaltet, dass ihre äußere Wirkfläche um ein definiertes Maß gegenüber der Unterseite des Sensorgehäuses hervorsteht. Das WFP Ankopplung sitzt nicht im direkten Kraftfluss, sobald das WFP Gehäuse/Struktur gebildet ist, siehe

Abbildung 4.4. Durch die elastische Verformung der Membran entsteht bei jeder Montage dieselbe Anpresskraft und zwar unabhängig von der auf das Gehäuse wirkenden Montagekraft, solange dieses nicht nennenswert verformt wird. Die Ankopplung ist also auch bei stark streuenden Montagekräften gut reproduzierbar.

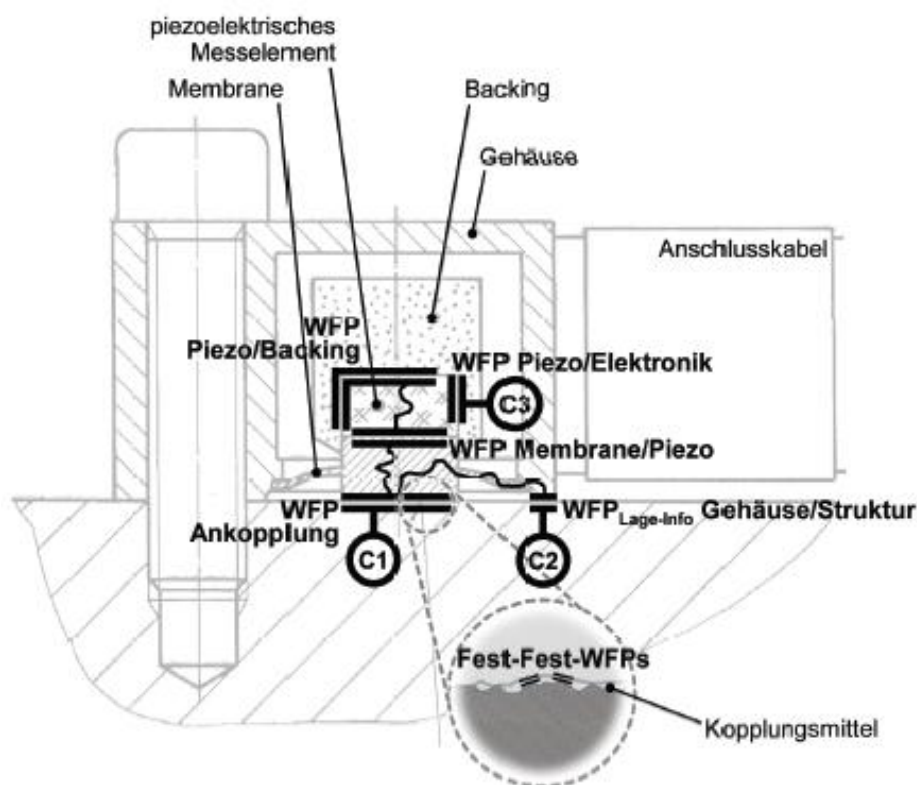


Abbildung 4.4: Schnittdarstellung Sensor Kistler Typ 815B²²⁷

Auf Grund der Elastizität der Membran sind relativ kleine Montagekräfte ausreichend. Dies erlaubt die Montage mittels eines magnetischen Haltebügels alternativ zur Schraubmontage, welcher in Abbildung 4.5 zu sehen ist und im Rahmen der Untersuchungen verwendet wurde. Wie vom Hersteller empfohlen wurde in das makroskopische WFP von Sensor und Struktur Silikonfett als Kopplungsmittel eingebracht²²⁸. Das Kopplungsmittel fungiert als fluidische Leitstützstruktur und bildet

²²⁷ Nach (KISTLER, 2007) und (DICKERHOF, 2011)

²²⁸ Nach (KISTLER, 2007)

überall dort WFPs mit Membran und Struktur, wo sonst Luft als Zwischenmedium vorhanden wäre. Die LSS Luft wird also substituiert. Damit soll erreicht werden, dass man eine bessere Ankopplung sowie eine höhere Reproduzierbarkeit erhält. Wie in Kapitel 2.6.2 beschrieben, ist der Reflexionsfaktor vom Impedanzsprung zwischen zwei Ausbreitungsmedien bestimmt. Da die Schallkennimpedanz der Luft mit ca. 413 Ns/m^3 bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ sehr klein gegenüber der von Grauguss mit ca. $35 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ ist, ergäbe sich ein großer Reflexionsfaktor von annähernd 1 beim Übergang von Strukturwerkstoff zu Luft und ebenso von Luft zur Stahlmembran des Sensors. Durch Austausch von Luft gegen Silikonfett mit einer Impedanz im Bereich einiger 10^6 Ns/m^3 wird der Reflexionsfaktor erheblich verringert. Die Transmission über WFP Membran/Piezo ist als unproblematisch anzusehen, da die Impedanz der Piezokeramik mit ca. $30 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ der von Grauguss relativ ähnlich ist.

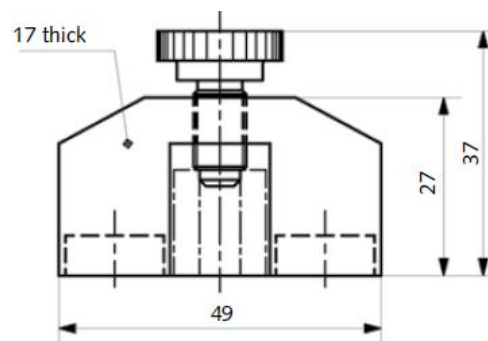


Abbildung 4.5 Magnetischer Haltebügel Kistler Typ 8443B für Sensor Typ 8152B²²⁹

Großen Einfluss auf die Sensoreigenschaften hat das sogenannte Backing. Es hat die Aufgabe, als akustischer Stumpf vom Messelement rückwärtig abgestrahlten Schall zu dämpfen. Dazu ist eine möglichst ungehinderte Transmission im WFP Piezo/Backing notwendig, es wird also auch hier ein niedriger Reflexionsgrad angestrebt. Eine hohe Dämpfung hat hier eine höhere nutzbare Bandbreite des Sensors zur Folge. Gleichzeitig wird aber die Empfindlichkeit reduziert. Die Wahl der akustischen Impedanz des Backings stellt immer einen Kompromiss zwischen einer Maximierung der Bandbreite oder der Empfindlichkeit dar.

Im Sensorgehäuse ist neben dem Messelement ein Impedanzwandler als Vorverstärker integriert. Als Hauptverstärker wird ein Hochfrequenz-Messverstärker vom Typ Kistler 5125B1 verwendet. Er dient gleichzeitig zur Speisung des im Sensor integrierten Impedanzwandlers und verfügt über einen integrierten Bandpassfilter mit

²²⁹ (KISTLER, 2007)

variablen Grenzflächen. Der Durchlassbereich wurde zu 50 kHz bis 500 kHz gewählt in Abstimmung an den Messbereich des Sensors²³⁰.

Für die Digitalisierung wurde ein 16 -Bit-A/D-Wandler der Firma National Instruments Typ NI USB-6251 mit einer maximalen Abtastrate von 1,25MS/s im Einkanalbetrieb und einer maximalen Summenabtastrate im Multiplexerbetrieb von 1MS/s verwendet.²³¹ Die Steuerung der Messungen, die Signalaufnahme, -speicherung und die -verarbeitung erfolgte durchgängig in MATLAB. Die Übertragung der digitalen Signale zum Rechner erfolgt über eine USB-Schnittstelle. Eine schematische Darstellung der gesamten Messkette ist Abbildung 4.6 zu entnehmen.

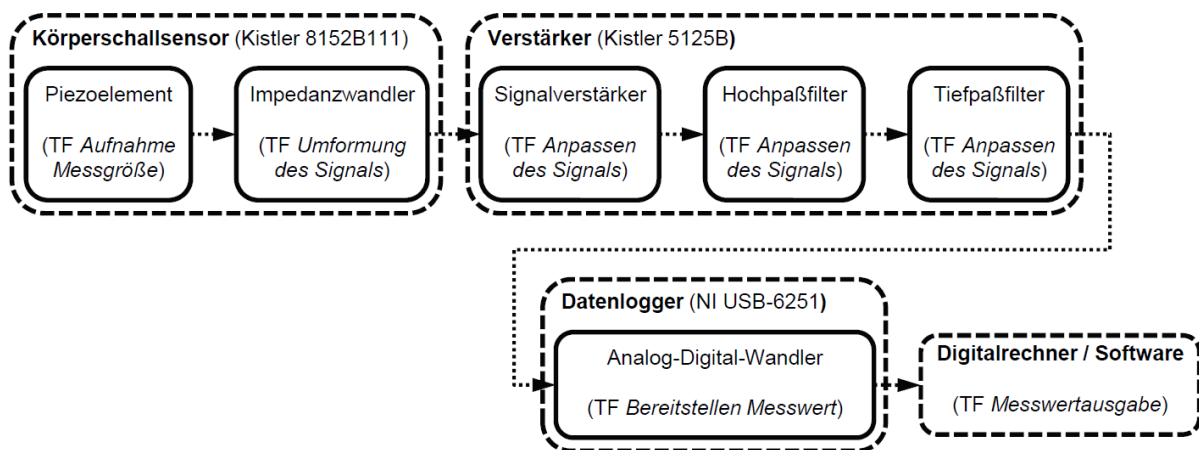


Abbildung 4.6: Verwendete Messkette zur Körperschallerfassung²³²

Das Körperschallsignal wird mit Hilfe eines Kistlersensors aufgenommen und läuft anschließend über einen Messverstärker zu einem Datenlogger, der mit dem PC verbunden ist. Als Aufnahme- und Auswertesoftware dient hierbei Matlab. Gleichzeitig ist das NI-Datenerfassungsgerät per BNC-Kabel mit dem Prüfstand verbunden, durch das gleichzeitig ein Signal an den Sensor geschickt wird, wann der Prüfstand startet. Dadurch ist später eine genaue Korrelation der Prüfstandsmessdaten und des Körperschallsignals möglich.

In Abgrenzung zu den bisher durchgeführten Untersuchungen aus dem Stand der Forschung, wird das Schallsignal frequenzspezifisch untersucht. Hierzu wurde die bisherige Unterteilung der Signalcharakteristika etwas gestrafft.

Wie in Kapitel 2.7.2 bei Körperschallemissionsanalysen beschrieben (siehe Abbildung 2.21) wurden bisher bei den Untersuchungen neben einem großen Frequenzspektrum die Amplituden der Schallsignale über der Zeit auf Grund ihres

²³⁰ (KISTLER, 2005)

²³¹ (NATIONAL INSTRUMENTS, 2007)

²³² (DICKERHOF, 2011)

unterschiedlichen Niveaus unterschieden in ein Grundrauschen, mittleres Feld und großen Amplituden, den Peaks. Die Gliederung in die einzelnen Bereiche war sehr individuell. Vor allem für die beiden Bereiche mittleres Feld und Peaks gibt es jedoch aus der Literatur keine allgemeingültige Abgrenzung zueinander. Die Gliederung in diese beiden Bereichen erscheint willkürlich zu sein und lässt Raum für Interpretationen. Die Unterteilung wurde bisher nur vorgenommen, um verschiedenen Verschleißarten zu untersuchen. Da dies nicht Schwerpunkt dieser Arbeit ist, wird hier nur zwischen einem Grundrauschen und dem restlichen Signal unterschieden und auf eine weitere willkürliche Aufteilung von mittlerem Feld und großen Amplituden verzichtet. Das Grundrauschen wurde ermittelt, indem das Geräuschniveau bei laufendem Prüfstand ohne Kontakt zwischen den Pellets und Gegenreibrscheibe in den einzelnen Frequenzen ermittelt wurde. Hier wurde auch das Grenzniveau hineingelegt, ab welchem nicht mehr von einem Hintergrundrauschen auszugehen ist.

Bei allen Amplituden ab diesem Niveau wurden dann die Peaks gezählt und deren Energie- bzw. Leistungsniveau mit in die Auswertung aufgenommen und ausgewertet. Somit lässt sich das Signal eindeutig in im Prüfstand verursachten Schalleistung und durch die Reibung verursachten Schallsignalen unterscheiden.

4.2.2 Radionuklidtechnik

Die Funktionsweise der Radionuklidtechnik wurde bereits in Kapitel 2.7.1 beschrieben. Das Verfahren wurde als Referenzverfahren für die Körperschallemissionsanalyse verwendet, um abgeleitete Thesen aus den Analysen des Körperschallsignals mit Onlineverschleißmessungen der RNT abzugleichen. Die Schwierigkeit bestand hierbei darin, dass dieses Verfahren eigentlich für nasslaufende Tribosysteme eingesetzt wird und Öl als Transportfluid für die Partikel ausschied. Um das Verfahren erstmals für Luft als Transportmedium anzupassen, mussten dafür konstruktive Änderungen am bestehenden TRM 1.0 vorgenommen werden, worauf in Kapitel 4.3.2 genauer eingegangen wird.

4.2.3 Thermografiekamera

Mit Hilfe der Thermografiekamera wurde die Oberfläche der Probenkörper während des Versuchs online aufgenommen. Die Temperaturdaten wurden genutzt um eventuelle Korrelationen mit der Körperschallanalyse aufzuzeigen. Zum Verständnis der Funktionsweise dieses Messprinzips soll die Funktionsweise der Thermografiekamera kurz erläutert werden.

Jeder Körper strahlt Energie in Form elektromagnetischer Strahlung ab, auch Eigenstrahlung oder Wärmestrahlung genannt. Die Intensität dieser Strahlung ist wellenlängenspezifisch und liegt bei Körpertemperaturen bis 1100°C im infraroten Bereich.

Wenn die von Infrarot-Kameras (IR-Kameras) gemessene IR-Strahlung in Temperaturen umgerechnet wird, spricht man von Thermografie.

Moderne IR-Kameras funktionieren sehr ähnlich wie digitale Videokameras. Sie basieren auf einem 2-dimensionalen Detektorchip, der beim Auftreffen von Licht elektrische Signale generiert. Der Detektor wird für eine bestimmte Zeit (Belichtungszeit bzw. Integrationszeit) belichtet und dann Pixel für Pixel ausgelesen und digitalisiert. Bei IR-Kameras erfolgt die Digitalisierung mit einer hohen Dynamik von 14 Bit.

Der Spektralbereich von IR-Kameras erstreckt sich innerhalb einer Wellenlänge von 1,5µm bis 14µm. Die Kameras werden für den Einsatz in bestimmten Wellenlängenbereichen ausgelegt. Die meisten Infrarot-Objektive sind aus Silizium, Germanium oder Zinkselenid hergestellt und sind für einen dieser Bereiche optimiert und nur für diesen geeignet. Kamera und Objektiv müssen für das gleiche Aufmaß konstruiert sein.

Um eine hohe Abbildungsqualität zu erreichen, sind eine große Lichtstärke (kleines Öffnungsverhältnis) und eine hohe Transmission des Objektivs notwendig. Die wichtigste Kenngröße für Objektive ist die Brennweite. Mit steigender Brennweite wird der Blickwinkel des Objektivs kleiner.

Häufiger als die absolute Temperatur ist jedoch die relative Temperaturveränderung im zeitlichen Verlauf für die Beurteilung eines Prüfteils oder Phänomens relevant. Man spricht von IR-Imaging, wenn keine absoluten Temperaturen ermittelt werden.

So wichtig wie die richtige Wahl der IR-Kamera ist die richtige Wahl der IR-Messtechnik. Man unterscheidet passive und aktive Messverfahren. Bei den passiven Messverfahren werden Infrarotkontraste genutzt, welche das Messobjekt ohne die gezielte Anwendung einer externen Wärmequelle aufweist. Aktive Messverfahren nutzen eine externe Anregung, um räumliche und zeitliche Temperaturänderungen (Transienten) im Messobjekt zu erzielen. Das bekannteste aktive IR-Messverfahren ist die sogenannte Impuls-Thermografie.

Weitere Verfahren sind das IR-Lock-in und die Thermoelastische Spannungsanalyse. Als Anregungsquellen können beispielsweise Halogenlampen, Blitzlampen, Laser,

Ultraschallköpfe, elektrische und magnetische Felder, UV- und Mikrowellen verwendet werden.²³³

4.2.4 Weißlichtinterferometer

Mit dem Weißlichtinterferometer wurden die Oberflächen der eingesetzten Werkstoffe nach jedem Versuch vermessen, um so die Rauigkeiten und Traganteilsprofile ermitteln zu können. Das Verfahren wurde ebenfalls dazu genutzt um durch den Höhenabgleich in den Bildern vor und nach den Versuchen das Verschleißvolumen festzustellen. Zum Verständnis der Messtechnik wird hier kurz auf die Funktionsweise des Geräts eingegangen.

Das genutzte Weißlichtinterferometer FRT CWL arbeitet nach dem Prinzip der chromatischen Abstandsmessung. Weißes Licht wird mit einem Messkopf starker wellenlängenabhängiger Brennweite auf die Oberfläche fokussiert.

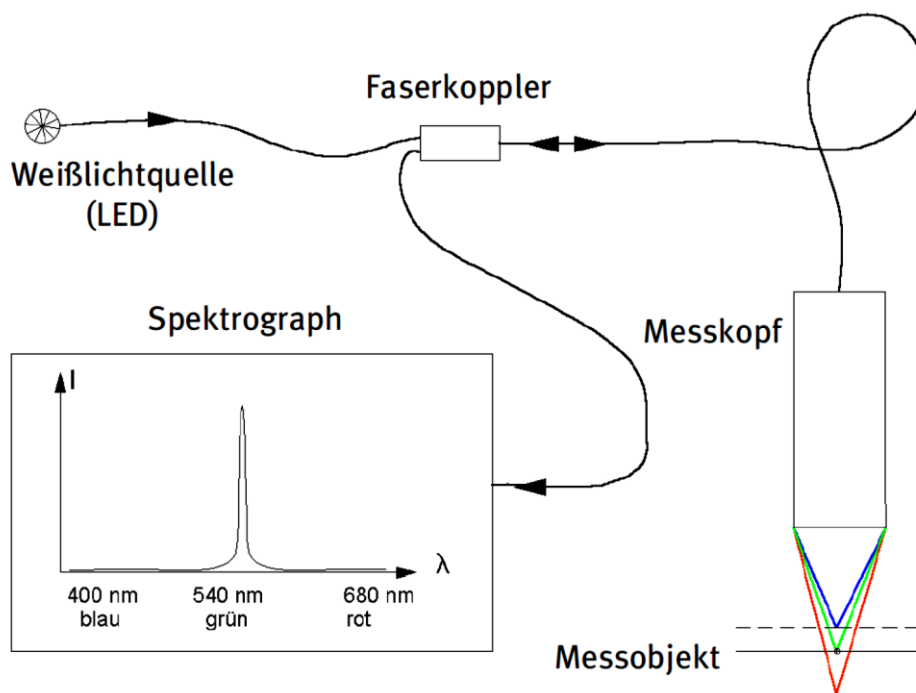


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des Messprinzips²³⁴

Das Spektrum des an der Oberfläche gestreuten Lichtes zeigt einen Peak, aus dessen Wellenlänge die Höhe auf der Probe bestimmt wird.²³⁵

²³³ (IRCAM, 2011)

²³⁴ FRT Operating Manual erhältlich bei MicroProf (FRT, 2011)

²³⁵ FRT Operating Manual erhältlich bei MicroProf (FRT, 2011)

Das Gerät wird in Verbindung mit dem MicroProf 200 Multisensor von FRT betrieben. Es kommt ein Sensor mit minimaler Auflösung von $2,5\mu\text{m}$ in horizontaler Ebene und $3\mu\text{m}$ in vertikaler Richtung zum Einsatz. Die maximale Summe der abgefahrenen Punkte liegt bei 25×10^6 . Dabei verfährt die Lichtquelle bahnenweise über die zu vermessende Fläche.

Ein entscheidender Faktor bei der Vermessung der Oberflächen mit dem Gerät ist die Geschwindigkeit der Messungen und damit die Zeit. Diese nimmt mit steigender Anzahl und Abstand von Bahnen bzw. Punkten pro Bahn exponentiell zu. Hierzu wurden im Vorfeld umfangreiche Versuche durchgeführt, um eine Balance zwischen vertretbarer Messdauer und hinreichender Genauigkeit der Messungen zu finden²³⁶. Die maximale Abtastrate beträgt hierbei immer 1 kHz.

4.2.5 REM + EDX-Analyse

Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) wird genutzt, um Bilder von den Oberflächen der Proben zu machen und um Partikel zu analysieren.

Ein fein gebündelter energiereicher Elektronenstrahl (1–30keV) wird rasterförmig über die Probenoberfläche bewegt. Diese Elektronen wechselwirken mit den Elektronen der Atome der Probe. Der Elektronenbeschuss verursacht dadurch u.a. die Aussendung von niederenergetischen Sekundär-Elektronen, deren Anzahl vor allem von der Oberflächengeometrie des jeweiligen Emissionsortes bestimmt wird. Die Sekundär-Elektronen werden mit einer Zugelektrode abgesaugt und die Stärke dieses Sekundärelektronenstroms zur Intensitätssteuerung des Elektronenstrahls eines Bildschirms herangezogen, dessen Achsführung synchron zur Probenrasterung läuft. Dadurch entsteht eine Punkt-für-Punkt-Abbildung der Probenoberfläche im Lichte der Sekundärelektronen.

Da die Abbildung ohne Linsen auskommt, werden die damit verbundenen Unzulänglichkeiten, wie stark eingeschränkter Tiefenschärfebereich und Verzeichnungsfehler, vermieden. Das REM eignet sich zur Analyse und Darstellung der Oberflächengestalt von Millimeter- bis Nanometer- Strukturen, für die Suche nach Strukturanomalien und Schadstellen in Oberflächen wie Korrosionsinseln etc. Ferner dient es als idealer Such-Monitor für EDX- Analysen.

Bei der Energie-Dispersive-Röntgenstrahlung-Analyse (EDX-Analyse) wird die Probe ebenfalls mit Elektronen (15-25keV) beschossen. Diese Elektronen lösen dann Röntgenstrahlen aus, wobei die Strahlungsenergie typisch für das Atom ist, aus dem

²³⁶ Auf die Ergebnisse wird in Kapitel 4.4 näher eingegangen.

das Röntgen-Quant emittiert wurde. Werden die Röntgenstrahlen mit einem Energie-Spektrometer separiert und misst man ihre Intensität bei den jeweiligen Energien, so liefert jeweils die Strahlungsenergie das Indiz für die Atomart und die Intensität ein Maß für die Konzentration, mit der die Atomart in der analysierten Probenschicht einige Mikrometer Dicke vertreten ist.

Qualitativ erhält man so die Art der Elemente und deren orts aufgelöste Verteilung in der Probe sowie quantitativ die Konzentration der Elemente²³⁷.

²³⁷ (LEUTE, 2004)

4.3 Eingesetzte Prüfstände

Im Rahmen der Arbeit soll eine Übertragung der Ergebnisse von Körperschallemissionsanalysen innerhalb der Validierungsprozesskette des IPEK von Prüfkategorie VI auf Prüfkategorie V näher beleuchtet werden. Der Umbau des Trockenreibmodellprüfstandes für die RNT-Messungen wird hier ebenfalls erläutert.

4.3.1 Trockenreibmodellprüfstand (TRM 1.0) am IPEK

Der Trockenreibmodellprüfstand (TRM), Prüfkategorie V, eignet sich insbesondere zur Untersuchung von Reibbelagsproben auf Probekörpererebene hinsichtlich ihres grundsätzlichen Reibverhaltens²³⁸. Der Aufbau ist in Abbildung 4.8 zu sehen. Der Prüfstand hat eine axial bewegliche Seite, über die man die Flächenpressung auf die Probenkörper aufbringen kann und auf der in diesem Fall die Gegenreibrscheibe aus Grauguss montiert ist.

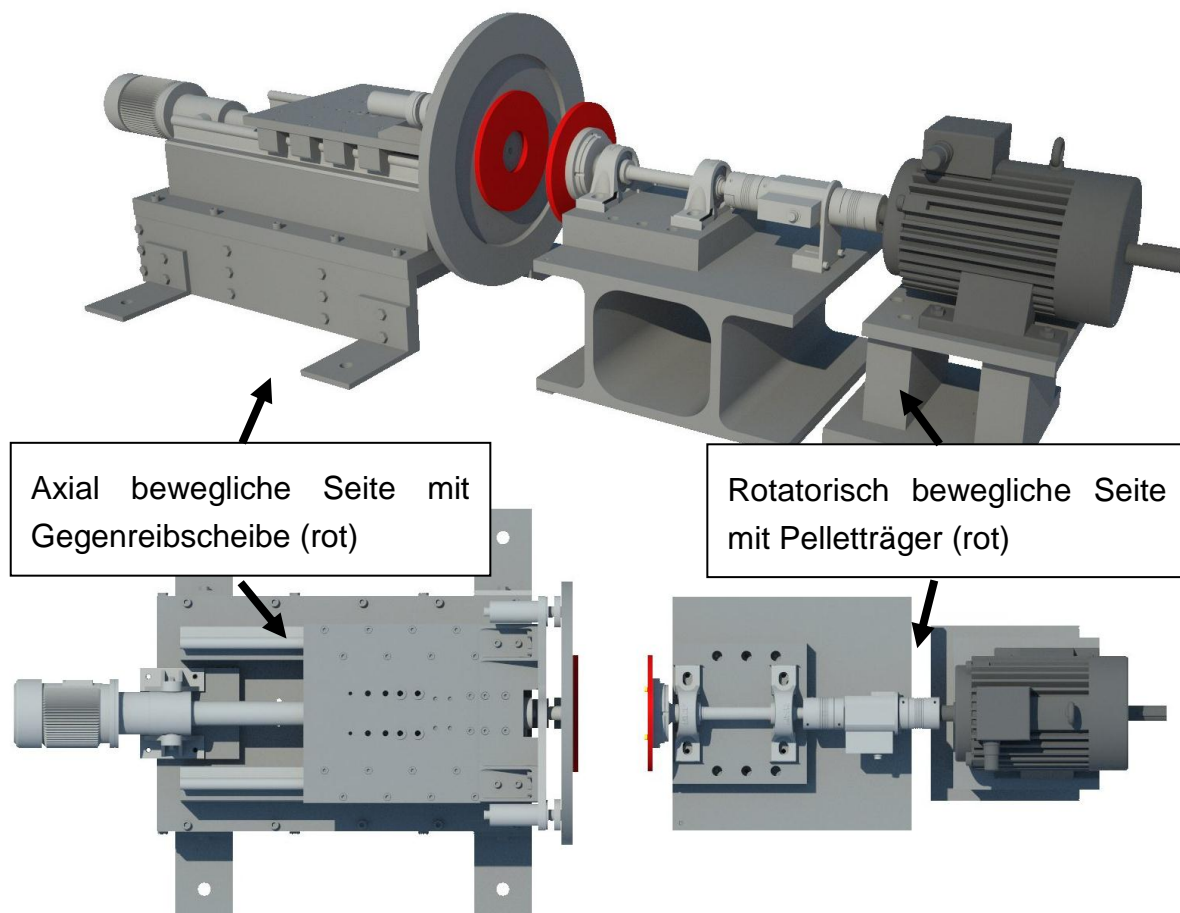


Abbildung 4.8: Trockenreibmodellprüfstand TRM am IPEK

²³⁸ (ALBERS u. a., 2007b)

Die Seite wird über einen Schlitten mit Stellmotor axial geführt. Der Belagsprobenträger mit Pellets befindet sich auf der rotatorisch beweglichen Seite, welche über einen Elektromotor angetrieben wird.

An diesem Prüfstand können die relevanten Einflussgrößen der Friktionspaarungen systematisch analysiert und identifiziert werden. Dieser Prüfstand bietet die Möglichkeit, unter zeitlich veränderbaren Gleitgeschwindigkeiten und Flächenpressungen einen Vergleich zwischen den Friktionspaarungen herzustellen. Um die Prüfstands- und Prüfmaterialkosten möglichst gering zu halten, können Reibbelagsproben genommen werden.

Die Übertragbarkeit von Ergebnissen von Reibuntersuchungen innerhalb der tribologischen Prüfkette von Kategorie V hin zu Kategorie I wurden bereits in Vorgängerarbeiten von MITARIU²³⁹ und KARRER²⁴⁰ nachgewiesen. Demzufolge ist der TRM ein geeigneter Prüfstand, Friktionswerkstoffe in Hinblick auf ihren späteren Einsatz in Bremsen und Kupplungen zu testen²⁴¹.

Der Körperschallsensor wurde im Abstand von 100 mm zur Laufbahn angebracht (Abbildung 4.9). Eine nähere Anbringung war aufgrund der Temperaturentwicklung während des Reibprozesses nicht möglich, da die maximale Obergrenze des Sensors laut Hersteller 65 °C beträgt.

²³⁹ (MITARIU-FALLER, 2009)

²⁴⁰ (KARRAR, 2009)

²⁴¹ (ALBERS u. a., 2007b); (ALBERS A., 2006)

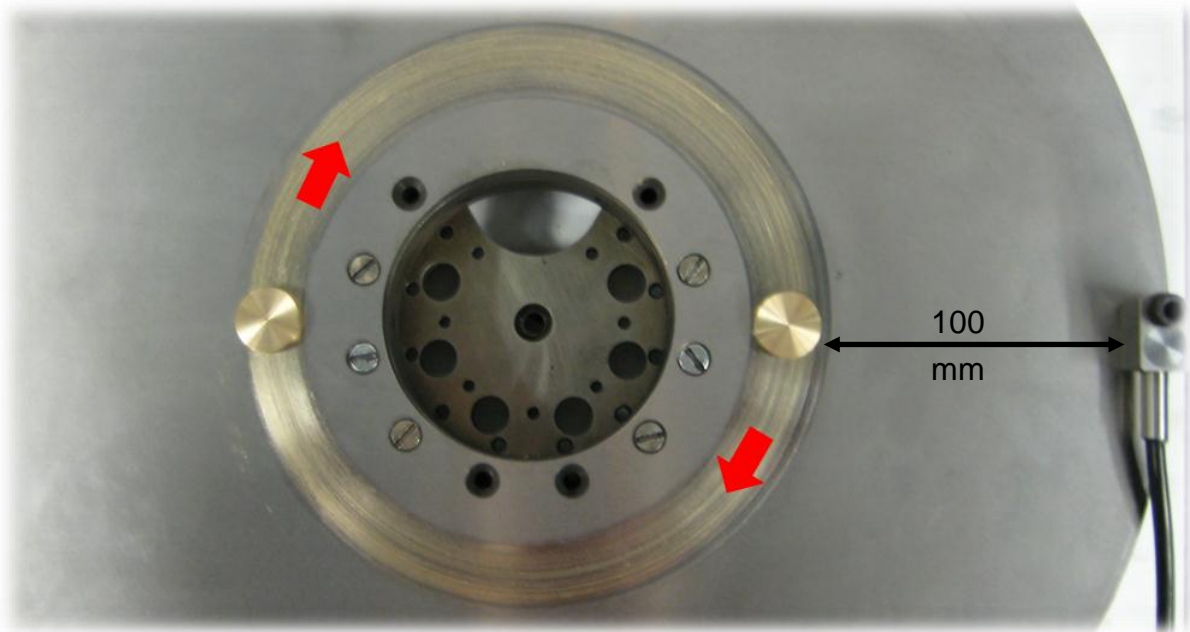


Abbildung 4.9: Detaillierte Darstellung der Sensorposition auf der Gegenreibrscheibe im Verhältnis zu den Pellets auf der Reibbahn. In diesem Bild ist das Pelletmaterial Messing.

4.3.2 Trockenreibmodellprüfstand (TRM 2.0) an der IAVF

Im Rahmen der Arbeit wurde für den Vergleich mit konventioneller Onlineverschleißmesstechnik ein vom Aufbau identischer Trockenreibmodellprüfstand bei der IAVF GmbH Karlsruhe aufgebaut. So konnten die Ergebnisse aus den Körperschallmessungen mit Hilfe der RNT online validiert werden.

Mit der RNT werden typischerweise tribologische Systeme untersucht, wobei die Verschleißpartikel mit einem Fluid als Transportmittel ausgespült werden. Bei Onlineverschleiß-Untersuchungen an trockenlaufenden Friktionssystemen steht jedoch nur die den Kontakt umgebende Luft als Transportmedium zur Verfügung. Somit musste das Einfangen der Verschleißpartikel modifiziert werden, um zu gewährleisten, dass alle umherfliegende Partikel aus dem Reibkontakt möglichst zeitnah der Auswerteeinheit zugeführt werden. Dafür musste der Bereich um das Wirkflächenpaar Pellet/Gegenreibrscheibe gekapselt werden.

Zur Auslegung des Filtersystems der RNT Analyseeinheit ist die Kenntnis des Luftmassenstroms unabdinglich. Dieser ist wiederum bestimmt durch die notwendige Strömungsgeschwindigkeit und die Düsengeometrie. Die Strömungsgeschwindigkeit muss groß genug sein, um möglichst alle Abriebpartikel aufzufangen, bevor sie an der Wandung abprallen oder haften bleiben. Neben mikroskopischen Beschädigungen der Innenwand durch die Partikel ist eine Anhaftung dieser unerwünscht, da diese ja nicht erfasst werden würden, und somit das Messergebnis verfälschen täten. Um dies auszuschließen und um eine sichere Abführung der Partikel durch die

Luftströmung zu gewähren, ist die Kenntnis von Masse und Geometrie der Partikel wichtig, sowie deren Austrittsgeschwindigkeit aus dem Friktionskontakt. Hierzu wurden in ersten Grundlagenuntersuchungen die entstehenden Partikel analysiert. Abbildung 4.10 zeigt einen Ausschnitt der entstandenen Verschleißpartikel. Es ist zu erkennen, dass die Größe der Partikel stark streut. Man findet sowohl Partikel mit wenigen Mikrometern, als auch Partikel mit einigen zehn Mikrometern. Für die abfangende und ablenkende Luftströmung sind vor allem die großen Partikel wichtig.²⁴²

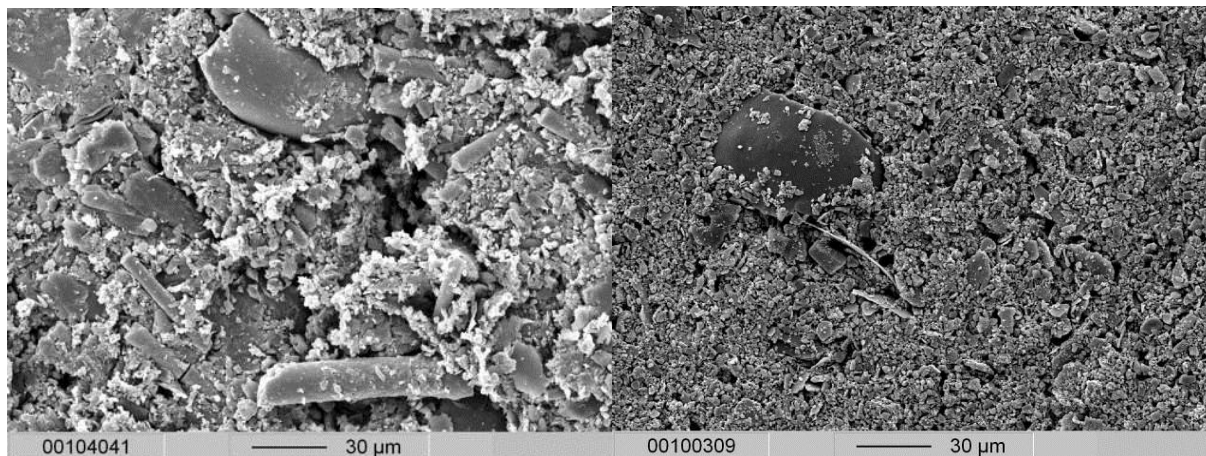


Abbildung 4.10: Abriebpartikel eines organischen Kupplungsbelags (REM Aufnahme) – Zoomstufe 30 µm mit Fasern (links) und ohne Fasern (rechts)

Die Auslegung der benötigten Luftströmungsgeschwindigkeit wurde mit Hilfe von Zweiphasenströmungssimulationen angegangen. Als Randbedingung wurde hier eine Partikelgröße von 100µm Durchmesser gewählt, mit der Dichte von Stahl. Es wurde ein maximaler Volumenstrom in der Kapsel von 0,027 m³/s als zulässig festgelegt, da dieser die Partikel vor dem Auftreffen auf die Gehäusewand abfing und dies der Maximalvolumenstrom war, bei dem der Reibkontakt innerhalb der Kapselung noch nicht abkühlte. Dies hätte das tribologische Verhalten im Kontakt geändert und somit auch einen Einfluss auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse gehabt.

²⁴² (FA. IAVF GMBH, 2010)

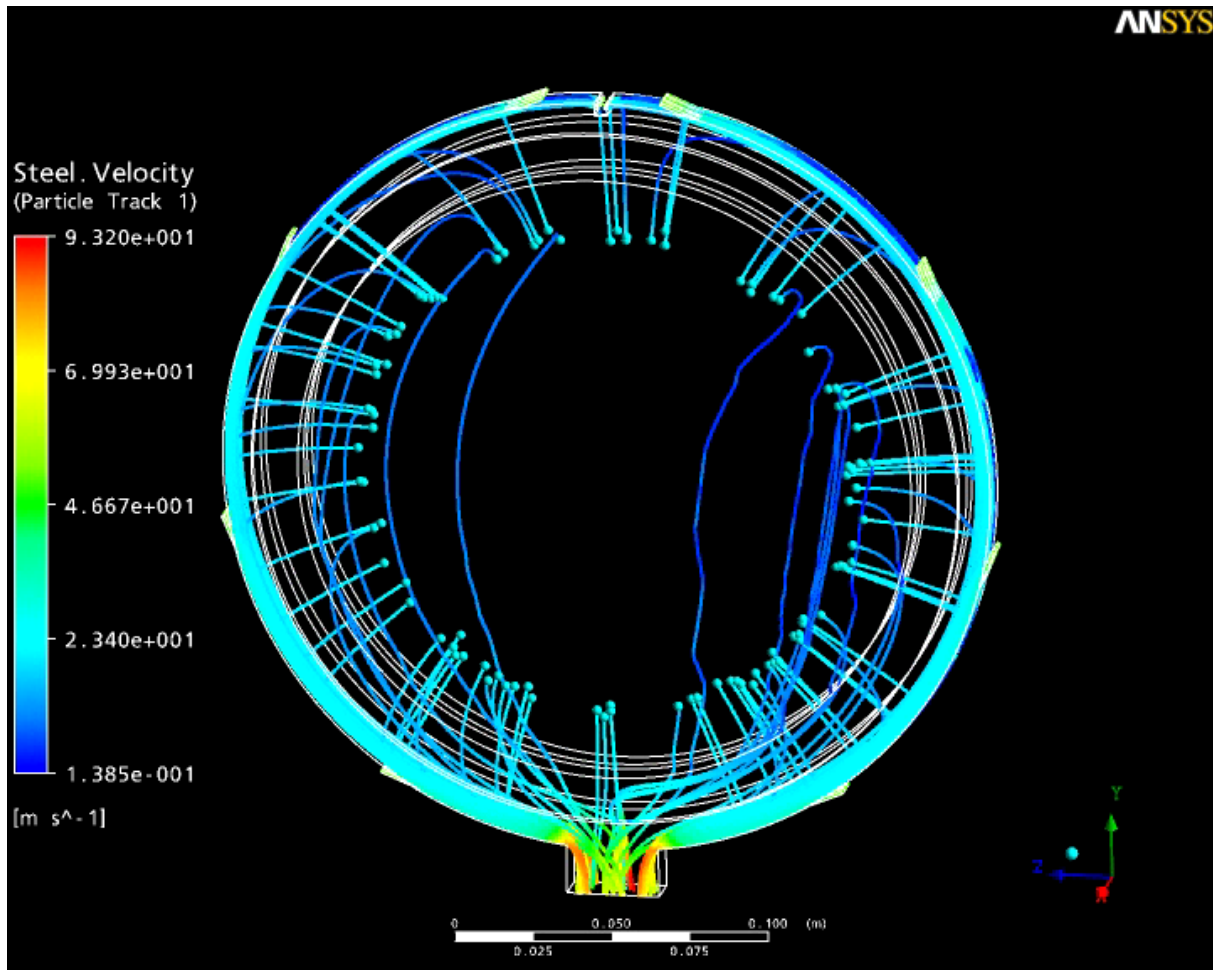


Abbildung 4.11: Zweiphasenströmungssimulation von Partikeln im Gehäuse bei einem Volumenstrom der Luft von $0,027 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Partikelgröße von $100\mu\text{m}$.

Damit sich keine Partikel an der Wand niederschlagen, wurden die Düsen in einem sehr flachen Winkel zur Gehäusewand angeordnet. Hierbei wurde der Coanda-Effekt²⁴³ bei Fluiden genutzt, der wiederum helfen sollte, eventuell doch an der Wand haftende Partikel loszulösen und einem Ansaugstutzen zuzuführen. In Abbildung 4.11 ist der Verlauf der Zweiphasenströmung dargestellt, wie die Partikel, wenn Sie an der Gehäuseinnenwand ankommen, von der Strömung mitgerissen und zur unteren Öffnung hinausgeblasen werden.

Ergänzend zu den beschriebenen, wurden triboelektrische Effekte genutzt, die beim Reiben zwischen zwei Kontaktpartnern auftreten, um eine höhere Sicherheit zu gewährleisten. Es sollte zusätzlich sichergestellt werden, dass die Partikel nicht an der Wand haften.

²⁴³ (ARDENNE, 2005) S.591: Der Coanda-Effekt beschreibt das sich Anlegen einer Strömung an Oberflächen.

Werden zwei Körper aneinander gerieben und danach getrennt, so wird je ein Partner positiv und der andere negativ aufgeladen. Hierbei gibt es Stoffe, die leichter Elektronen aufnehmen oder abstoßen (Tribologische Reihe)²⁴⁴. Da in den verwendeten organischen Kupplungsbelägen eine Vielzahl von Metallen und Nichtmetallen vorkommt, entsteht eine breite Streuung an Materialien, die Elektronen aufnehmen oder eher abstoßen.

Dieser Streuung wurde entgegen gewirkt, indem auf der Gegenreibrscheibe zu den Pellets eine positive Spannung (ca. 3000 V) angelegt wurde. Lösen sich nun diese positiv geladenen Verschleißteilchen und geraten als Partikel in die Nähe der ebenfalls positiv geladenen Gehäusewand, werden sie aufgrund des gleichgepolten elektrischen Feldes abgebremst, abgestoßen, vom Luftstrom mitgerissen und schlagen sich somit nicht an der Gehäusewand nieder. Der Prüfraum wurde gegenüber dem Rest des Prüfstandes mit Thermosilikonfolie isoliert, welche die Wärme weiterleitet und elektrisch hochisolierend wirkt. Ein schematischer Aufbau der Kapselung ist in Abbildung 4.12 zu sehen.

²⁴⁴ (LEUTE, 2004b) S.185

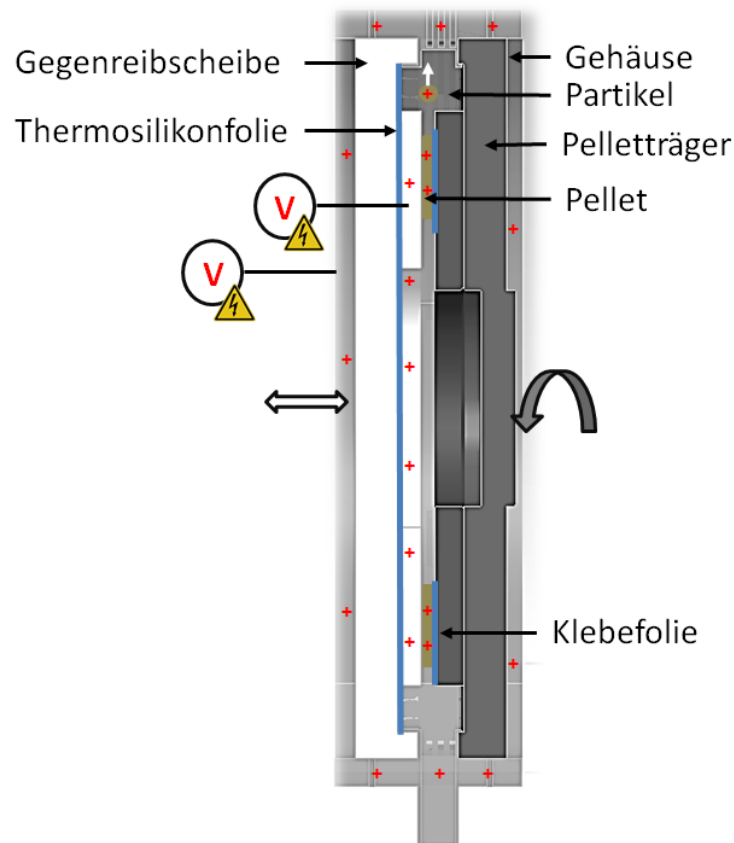


Abbildung 4.12: Schematische Darstellung des Aufbaus der Kapselung

Der Luftstrom an der Innenwand wird zusätzlich noch unterstützt, indem die Luft am Stutzen unten am Gehäuse abgesaugt wird, und somit im Gehäuse ein leichter Unterdruck erzeugt wird. Die stehenden und drehenden Teile sind durch eine Luftspaltdichtung gegeneinander abgedichtet.²⁴⁵ Der fertige Prüfstand ist in Abbildung 4.13 zu sehen. Der restliche Aufbau entspricht prinzipiell dem vorher beschriebenen TRM 1.0 des IPEK. Der Prüfstand wurde in umfangreichen Versuchsreihen getestet und die Kapselung wurde ebenfalls erfolgreich mit den beschriebenen Systemen validiert²⁴⁶. Die Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen zwischen dem TRM 1.0 und dem TRM 2.0 wurde nachgewiesen²⁴⁷.

²⁴⁵ (ALBERS u. a., 2009b)

²⁴⁶ (FA. IAVF GMBH, 2010)

²⁴⁷ (IPEK, 2010)

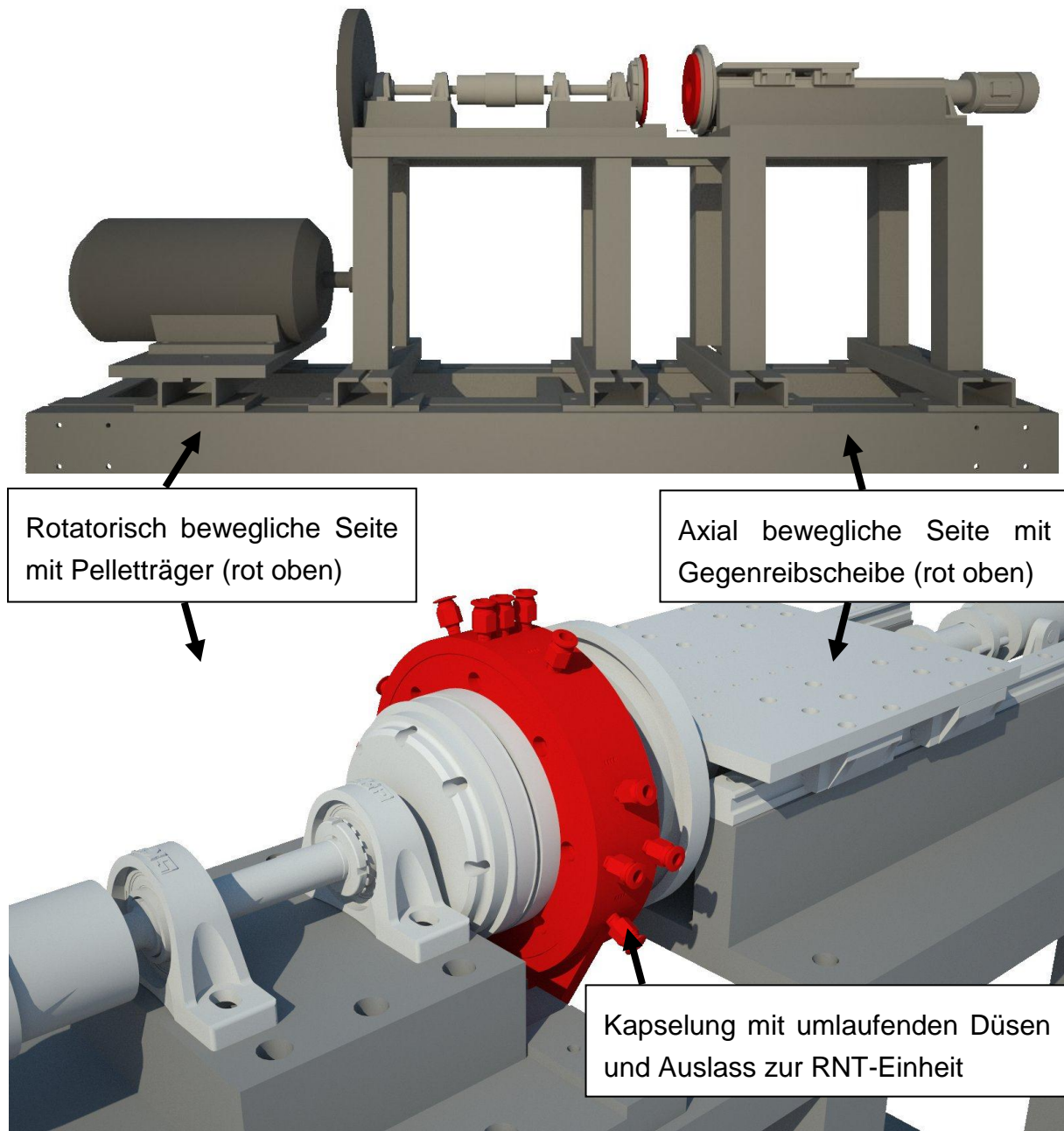


Abbildung 4.13: Trockenreibmodellprüfstand ohne Kapselung (oben) und detaillierte Ansicht mit Kapselung (unten) als Aufbau an der IAVF GmbH Karlsruhe.

Der Körperschallsensor wurde bei den Validierungen mit RNT mit Hilfe des Magnethalters aus Abbildung 4.5 an der Rückseite der Gegenreibrscheibe angebracht. Das Anbringen in der Kapselung ist hier aufgrund der Kapselung und des radioaktiven Umfelds innen nicht möglich und auch nicht gewünscht. Der Einfluss der veränderten Sensorposition auf das Körperschallsignal wird in Kapitel 5.1 beschrieben.

4.4 Versuchsplanung und -durchführung

Im Rahmen dieser Arbeit wird vor allem auf die frequenzabhängige Untersuchung von Körperschallphänomenen eingegangen.

Für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden unterschiedliche Probekörpergeometrien hergestellt und auf den Reibbelagsproben-Träger aufgebracht. Für die meisten Reib- und Verschleißuntersuchungen wurden Reibbelagspellets mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Dicke von 5 mm gefertigt, sofern andere Geometrien verwendet wurden, wird dies im Weiteren deutlich kenntlich gemacht. Zwei Reibbelagspellets werden mittels einer Klebefolie (Technicol 8401) von der Fa. Tesa auf den Reibbelagsträger aufgebracht. Der mittlere Reibradius beträgt dabei $r_m = 80$ mm (siehe Abbildung 4.14).

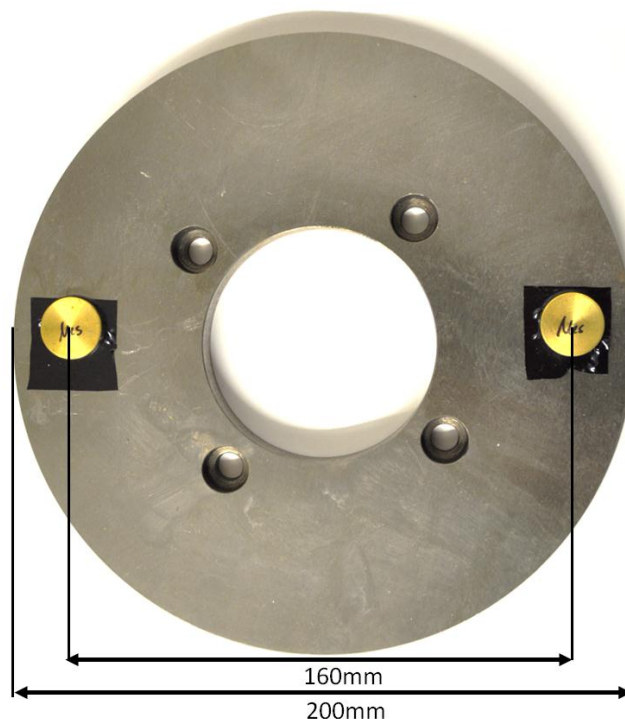


Abbildung 4.14: Probenkörperanordnung auf dem Pelletträger: Probenmaterial in diesem Fall: Messing

Als alternative Pelletgeometrien wurde ein Rechteck mit Länge x Breite x Höhe von 20x10x5 mm und ein Kreisausschnitt von $r=80$ mm einer Kreisausschnittsbreite von 20 mm, einer Tiefe von 5 mm und einer Dicke von 5 mm gewählt.

Anfangs wurde erst der Einfluss der Sensorposition auf das Körperschallsignal untersucht. Für die Messung der Übertragbarkeit der Ergebnisse aus der Literatur innerhalb der Prüfkategorien wurden anschließend Versuche mit Metallen durchgeführt. Danach wurden die gleichen Messungen für Verbundwerkstoffe wiederholt, um auch hier zu klären inwieweit Ergebnisse aus der Literatur und von Versuchen mit Metallen auf Reibversuche mit Verbundwerkstoffe übertragbar sind.

Als Versuchszeit für die Dauerschlupfversuche wurden 120 min gewählt, da sich sowohl bei den Metallen als auch bei den Verbundwerkstoffen nach ca. 90 min ein stationärer Zustand einstellte. Das Körperschallsignal wurde konstant über den gesamten Versuch immer alle 20 Sekunden über zwei Sekunden aufgenommen. Dies erzeugte 360 Messpunkte, die anschließend gemittelt wurden. Jeder Dauerschlupfversuch mit anschließender Untersuchung und Auswertung wurde dreimal wiederholt, um eine statistische Sicherheit zu haben.

Bei allen Versuchen wurden offline jeweils Verschleißvolumen, Rauigkeiten und Tragprofil bestimmt.

Für die Validierung der Online-Verschleißanalysen wurde ein Verbundwerkstoff gewählt und die Ergebnisse der Körperschalluntersuchungen mit Verschleißmessungen der RNT verglichen. Aufgrund der hohen Kosten der Aktivierung der Beläge, wurde dies nur für einen Reibbelag durchgeführt.

Für die Validierung der Einwirkung der Reibbelagsform auf das Körperschallsignal wurden die Online-Körperschallergebnisse Ergebnissen aus den Thermografiemessungen gegenübergestellt. Eine Übersicht der durchgeführten Versuche ist in Tabelle 4.4 gegeben.

Tabelle 4.4: Versuchsmatrix Versuche Metalle und Verbundwerkstoffe

Variation/ Material		Drehmoment- variation (Nm)		Drehzahlvariation (UpM)				Geometrie		
		5	10	600	800	1000	1200	rund	eckig	Kreis seg.
Metalle	Kupfer	x		x	x	x	x	x		
			x	x				x		
		x		x					x	
		x		x						x
	Aluminium	x		x	x	x	x	x		
			x	x				x		
	Messing	x		x	x			x		
			x	x				x		
	Grauguss	x		x	x			x		
			x	x				x		
	Stahl	x		x	x			x		
			x	x				x		
Verbundwerkst.	B-8402	x		x	x	x	x	x		
			x	x				x		
	R-087	x		x	x	x	x	x		
			x	x						

Da die RNT, wie bereits erwähnt, nur durch zertifizierte Einrichtungen betrieben werden kann und die Aktivierung und Nutzung der Technologie sehr kostspielig ist, wurde das Weißlichtinterferometer als zusätzliches Offline-Verfahren für die Verschleißmessung und die Vermessung der Oberflächen bei allen Versuchen genutzt.

Als untersuchende Fläche wurde dabei immer eine Fläche von 20x20 mm gewählt. Die Anzahl von Bahnen mal Punkten wurde dabei auf 1000x500 gesetzt. Damit wurden ein Abstand von Bahn zu Bahn von 20 µm und ein Punktabstand von 40µm gewählt. Es wurde eine maximale Abweichung von 11 % bei der Berechnung von Verschleißvolumen zur maximalen technischen Auflösung von 7500x2000 bzw.

2000x7500 festgestellt. Diese Auflösungen waren durch die vorhandene Rechnerkapazität limitiert. Die Zeit betrug statt 60 Stunden bei maximaler Abtastung bei der gewählten Abtastung zwei Stunden pro Messebene. Da die Messfelder bei allen untersuchten Proben mit der gleichen Auflösung überfahren wurden, ist die Abweichung bei allen gemessenen Volumen und Oberflächenparametern gleich. Es wurden jeweils immer beide Pellets vermessen, sowie auch das Reibfeld, das dem Sensor am nächsten war.

Die Partikelgrößen, bzw. die Oberflächen der Verbundwerkstoffe wurden unter Lichtmikroskopen und mittels REM untersucht. Zur Analyse des Aufbaues der Reibelagstrukturen wurden Schliffbilder gefertigt und ebenfalls mittels REM betrachtet.

Während der Körperschallerfassung ist das NI-Datenerfassungsgerät per BNC-Kabel mit dem Prüfstand verbunden, der gleichzeitig ein Signal an die Aufnahmesoftware sendet, wenn der Prüfstand startet. Dadurch ist später eine genaue zeitliche Korrelation der Prüfstandsmessdaten und des Körperschallsignals möglich

5 Körperschalluntersuchungen

Bei den folgenden Untersuchungen wurden die Einflüssen der Sensorposition und der Materialien auf das Schallsignal untersucht. Danach wurde dann die Normalkraft und die Gleitgeschwindigkeit, bzw. die Umdrehungsgeschwindigkeit variiert, um deren Einfluss auf das Schallsignal zu erhalten.

5.1 Einfluss der Sensorposition auf das Schallsignal

Damit auf dem Schallpfad so wenige Informationen wie möglich verloren gehen, muss der Körperschallsensor möglichst nah an der Schallquelle angebracht sein. Aus diesem Grund wurde als Referenzsensorposition die Position auf der Reibseite gewählt und diese so nah wie möglich an die Pelletlaufbahn gebracht. Aufgrund des Gehäuses am TRM 2.0 war dies hier nicht möglich. Daher ist der Körperschallsensor bei TRM 1.0 und TRM 2.0 auf unterschiedlichen Seiten installiert. Um den Einfluss der Sensorposition in Relation zur Körperschallquelle auf das Signalverhalten zu untersuchen, wurde der Sensor relativ zur Laufbahn an unterschiedlichen Positionen befestigt (siehe Abbildung 5.1).

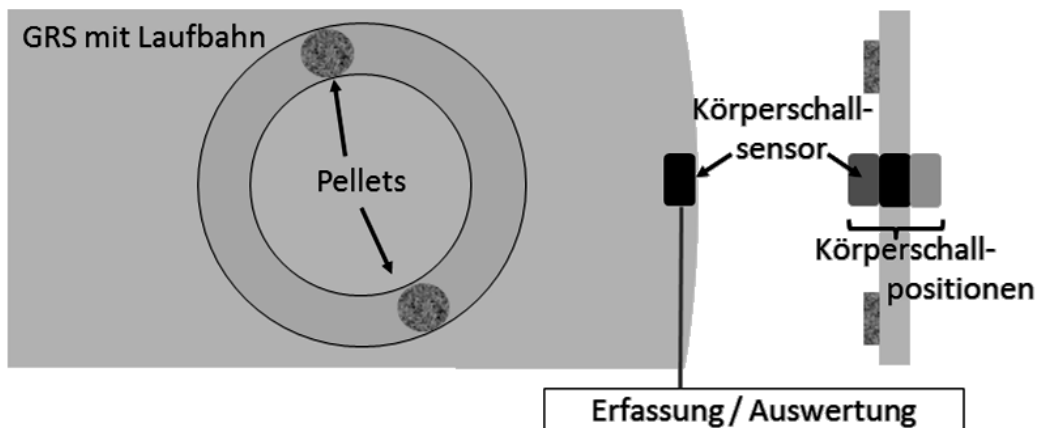


Abbildung 5.1: Verschiedene Sensorpositionen gegenüber der Gegenreibrscheibe (GRS) und zu den Pellets auf der Reibseite.

Der Sensor wurde an drei verschiedenen Positionen relativ zur Schallquelle positioniert: auf der Reibrscheibe, neben und hinter der Reibrscheibe. Abbildung 5.2 beschreibt die Spektrumsverteilung für Metalle, hier exemplarisch für Kupfer, und Verbundmaterial in Abhängigkeit der Sensorposition. Da im Folgenden frequenzabhängig untersucht werden sollte, lag hier der Fokus auf ähnlichen Frequenzcharakteristika, bei den unterschiedlichen Sensorpositionen. Um möglichst

wenige Frequenzen zusammenzufassen und bei dieser Frequenzbetrachtung dennoch zu gleichen Aussagen zu kommen, sollten die Charakteristika nach Möglichkeit nahe beieinander liegen.

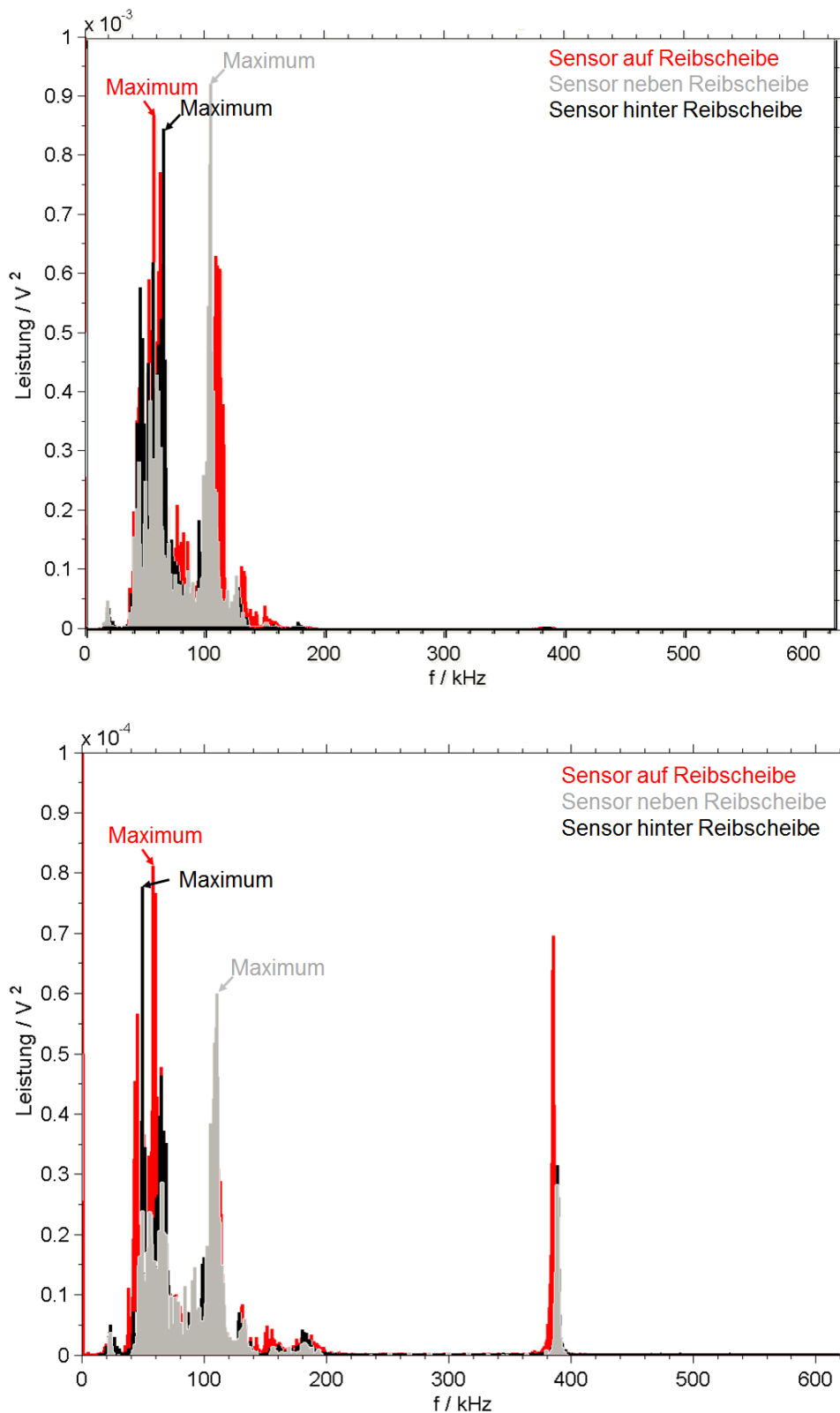


Abbildung 5.2: Frequenzbereichvergleich Metalle, hier beispielhaft Kupfer, (oben) und Verbundwerkstoffe mit Fasern (unten) bei verschiedenen Sensorpositionen

In Abbildung 5.2 sind die typischen Frequenzcharakteristika für Metalle, in diesem Fall Kupfer, und für Verbundwerkstoffe, in diesem Fall der Faserverbundwerkstoff aufgetragen. Interessant sind für die weitere Betrachtung hauptsächlich die globalen Maxima.

Vergleicht man bei Metallen, in diesem Beispiel Kupfer, in Abbildung 5.2 die Amplitudencharakteristiken der einzelnen Positionen, so ist deutlich, dass bei der Sensorposition „auf“ zu „hinter“ das Signal von $0,87 \text{ V}^2$ auf $0,85 \text{ V}^2$ sinkt, aber diese beiden globalen Maxima 8 kHz auseinander und damit sehr nah beieinander liegen. Abgesehen von der leichten Verschiebung der globalen Maxima entspricht sich der übrige Verlauf der beiden Kurven. Die kleinere Schalleistung lässt sich auf die Dämpfung der Grauguss-scheibe zurückführen.

Bei der Sensorposition „neben“ der Schallquelle ist zu erkennen, dass das globale Maximum mehr als 50 kHz hin zu großen Frequenzen verschoben ist, die Schalleistung mit $0,92 \text{ V}^2$ deutlich gestiegen ist und sich die Charakteristik der Kurve stark von den anderen beiden Positionen unterscheidet. Das nicht mehr die gleichen Frequenzen angeregt werden, kommt durch die Dämpfung und die um 90° veränderte Sensorposition relativ zur Laufbahn der Pellets²⁴⁸.

Der Verbundwerkstoff mit Fasern zeigt für die einzelnen Sensorpositionen einen ähnlichen Trend. Die beiden Sensorpositionen „auf“ und „hinter“ der Reibscheibe weisen einen ähnlichen Verlauf über der Frequenz auf. Die globalen Maxima liegen bei beiden Positionen mit 9 kHz Differenz nah beieinander, sind aber in Richtung niedrigere Frequenzen verschoben. Die Verschiebung des Frequenzbandes ist typisch für die Materialkombination des Wirkflächenpaares. Der Verbundwerkstoff weist auf Grund seines Aufbaues ein ganz anderes Schwingungsverhalten auf als ein Metall. Somit sind die Änderungen und Verschiebungen in den Frequenzen zu erklären. Auch hier ist die Schalleistung bei der Sensorposition „hinter“ der Gegenreibscheibe gegenüber der Schallkurve „auf“ der Reibscheibe um 6% gedämpft. Die Sensorposition „neben“ der Reibscheibe weicht von Ihrem Maximum von der Referenzposition deutlich ab und der Verlauf über der Frequenz ähnelt sich ebenfalls nicht wesentlich. Die Erklärung ist hier ebenfalls wie bei Metallen die Sensorposition 90° relativ zur Laufbahn der Pellets und der deutlich unterschiedliche Aufbau des Werkstoffes.

Zusammenfassend kann für beide Materialien festgehalten werden, dass die Sensorposition „auf“ und „hinter“ der Reibscheibe ein ähnliches Körperschallsignal ergibt. Wobei hierbei die Amplitudencharakteristika, d.h. die lokalen und globalen

²⁴⁸ Siehe hierzu Kapitel 2.5.3

Maxima in einem Frequenzband von max. 10 kHz Abstand liegen und damit nicht stark variieren. Die Amplituden sinken bei der Verschiebung der Sensorposition von „auf“ zu „hinten“ der Reibseite leicht und es kommt zu einer Frequenzverschiebung.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wird der Sensor beim TRM 1.0 auf der Reibscheibe angebracht und als Ausweichmöglichkeit beim TRM 2.0 auf der Rückseite der Reibscheibe. Die Analyse der Frequenzinhalte findet in 10 kHz-Schritten statt, damit ein Vergleich der Körperschallsignale zwischen den beiden Prüfständen möglich ist.

5.2 Einfluss des Materials auf das Schallsignal

In Abgrenzung zu bisherigen anderen wissenschaftlichen Arbeiten sollen bei dieser Arbeit die in Kapitel 2.7.2 bisher herauszulesenden tribologisch beeinflussten Phänomene, wie z.B. Verschleiß, frequenzspezifisch untersucht und herausgefunden werden, ob solche Phänomene materialunabhängig hauptsächlich bestimmte Frequenzen beeinflussen. Hierfür wird aufbauend auf den Arbeiten von MECHEFSKE u.A.²⁴⁹ zunächst der Frequenzbereich von 0-600 kHz untersucht, da hier die meisten tribologischen Vorkommnisse auftreten. In diesem Bereich wird im Folgenden die Frequenzanalyse weiter eingeschränkt.

Aus bisherigen Arbeiten²⁵⁰ ist ebenfalls bekannt, dass das Körperschallsignal vor allem durch Transferpartikel und Verschleißpartikel stark beeinflusst wird. Ferner ist aus bisherigen Arbeiten zu erkennen, dass der Verschleiß vor allem durch Belastungsvariation bzw. Änderung des Anpressdruckes des Stiftes auf der Scheibe verursacht wurde. D.h. Lastvariationen auf einen tribologischen Kontakt verursachte im Vergleich zu Gleitgeschwindigkeitsvariationen eine bedeutend höhere Verschleißrate im Kontakt. Dies spiegelt sich in den Amplituden des Körperschallsignals wieder.

Aus diesem Grund wird am Beispiel einer Lastvariation von 5 Nm auf 10 Nm Drehmoment an unterschiedlichen Materialien untersucht, welcher Frequenzbereich am sensibelsten auf diese Drehmomentvariation und damit auf Verschleiß reagiert und sich somit zur Charakterisierung der tribologischen Phänomene durch Körperschall eignet.

²⁴⁹ (MECHEFSKE u. a., 2002)

²⁵⁰ Siehe hierzu Kapitel 2.7.2

5.2.1 Einfluss von Metallen

Um nun die Reaktionen von verschiedenen Frequenzen auf Lastvariationen zu analysieren, wurden in ersten Grundlagenversuchen mit verschiedensten Metallen, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, runde Pellets gegen eine Graugusscheibe bei 5 und 10 Nm Drehmoment und einer konstanten Drehzahl von 600 UpM gerieben. Die Körperschallkurven der einzelnen Frequenzbänder aus der Drehmomentvariation wurden voneinander subtrahiert, um die Bereiche mit den größten Änderungen kenntlich zu machen. Anschließend wurde die Kurve jeweils normiert auf die Frequenz mit der Maximaländerung und die so erhaltene frequenzspezifische Empfindlichkeit zwischen allen Metallen verglichen (siehe Abbildung 5.3).

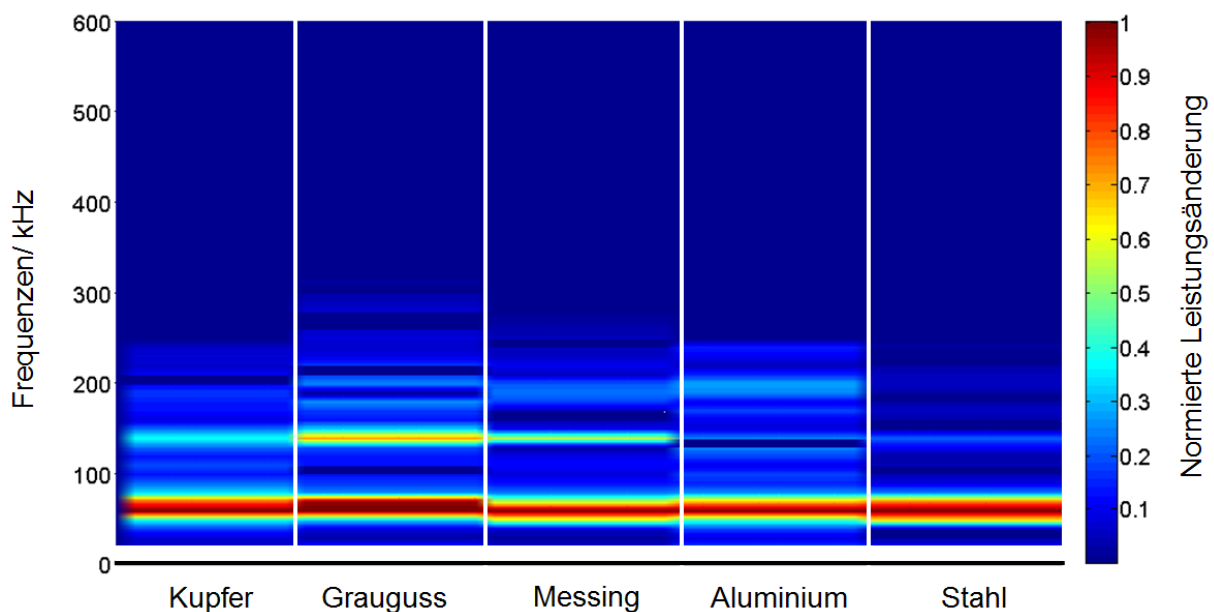


Abbildung 5.3: Normierte Leistungsänderung der einzelnen Frequenzen bei Variation des Drehmoments von 5 Nm auf 10 Nm normiert auf die Maximalfrequenz des jeweiligen Materials bei konstanten 600 UpM

In Abbildung 5.3 sind nun die Frequenzen der Metalle mit ihren Empfindlichkeiten gegenüber Drehmoment- bzw. Lastvariation dargestellt. Unabhängig vom eingesetzten Metall gibt es oberhalb einer Frequenz von ca. 300 kHz keine sichtbaren Änderungen in der Schalleistung mehr. Die Maximaländerung liegt bei allen Metallen in einem Bereich von 60 bis 70 kHz. Das lässt den Schluss zu, dass dieser Bereich auf Änderungen im Belastungskollektiv am sensibelsten reagiert. Mit steigendem Frequenzbereich nimmt der Einfluss von Änderungen im Belastungskollektiv bei allen Metallen ab.

Aus diesem Ergebnis kann der Schluss gezogen werden, dass es ausreichend ist den Frequenzbereich von 60-70 kHz für Analysen heranzuziehen und nicht wie in vorangegangenen Arbeiten den gesamten Bereich von 50 kHz-2Mhz zu untersu-

chen, da sich in den anderen Frequenzbereichen nur geringfügig bis gar nichts ändert.

In Abbildung 5.3 ist zu sehen, dass jedes Metall, trotz qualitativ ähnlichem Verlauf eine eigene individuelle Empfindlichkeit auf Lastvariation über den Frequenzen zeigt. In der folgenden Versuchsreihe wurden daher die Materialeigenschaften der unterschiedlichen Metalle und deren Einfluss auf das Körperschallsignal untersucht. Eine bisher eindeutige Zuordnung von Materialeigenschaften zu Körperschalleistungen ist aus der Literatur nicht bekannt.

Im Folgenden soll deshalb die Entstehung des Körperschalls und die Einflussgrößen auf die Schalleistung näher betrachtet werden. Ein entscheidender Bestandteil der Schallenergie ist neben der kinetischen Energie die potentielle Energie und damit die Masse des Körpers. Mit steigender Masse sollten die Schallenergie und damit die Schalleistung zunehmen. Um die Masse aller Stoffe miteinander vergleichen zu können, muss diese auf die gleiche Stoffmenge bezogen werden. Dies bezeichnet man als die molare Masse.

In den Versuchen in Abbildung 5.4 nun wurden bei konstanten 600 UpM und 5 Nm Drehmoment die genannten Materialien gegen Grauguss gefahren. In Abbildung 5.4 ist das Ergebnis der resultierenden Schalleistung gegenüber den molaren Massen der Metalle aufgetragen.

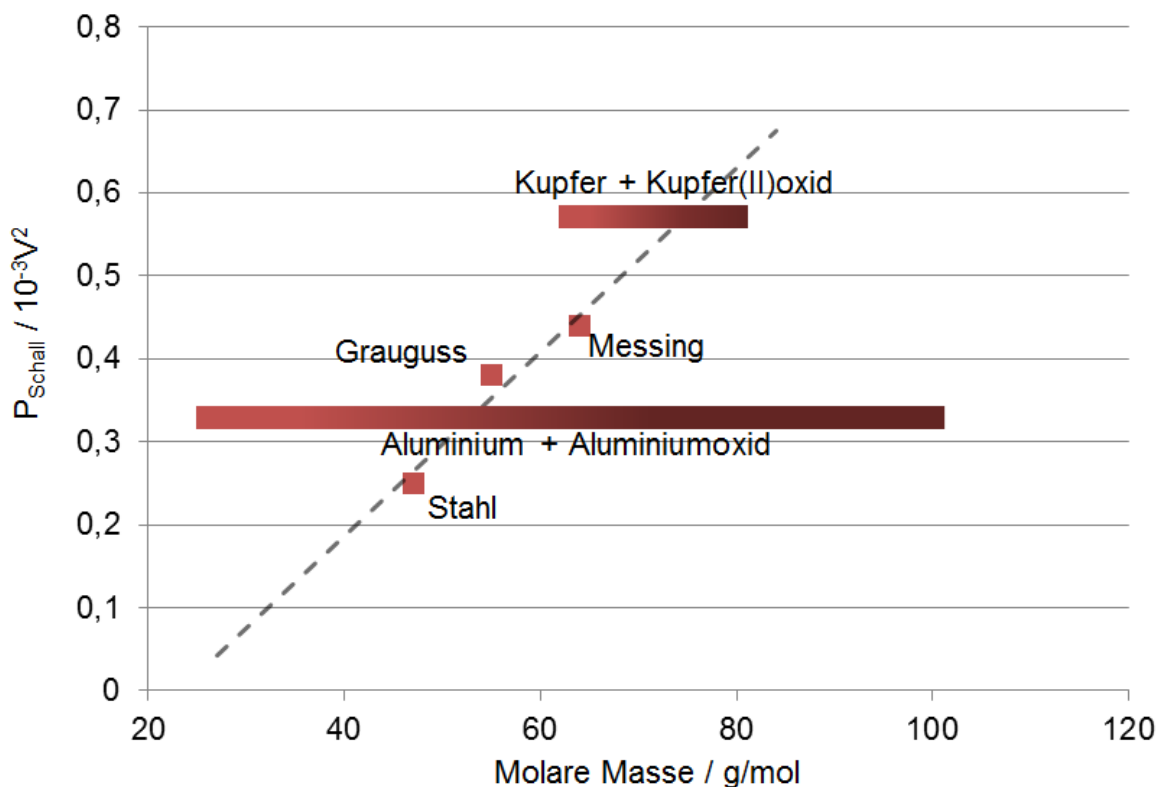


Abbildung 5.4: Körperschalleistung zu molaren Masse von Metallen und den entstehenden Oxiden unter Sauerstoffumgebung. Die Trendlinie beschreibt den Körperschallverlauf von Stahl, Grauguss und Messing und führt diesen Trend fort. Der Farbverlauf stellt den Anteil von reinem Metall (hellrot) bis hin zu reinem Oxid (dunkelrot) dar.

In dem Diagramm sind die Werkstoffe, die gegen Grauguss gerieben wurden dargestellt. Bei Stahl, Grauguss und Messing steigen mit der molaren Masse die Schalleistung und dieser Zusammenhang verläuft annähernd linear, was durch die gestrichelte Gerade kenntlich gemacht ist. Bei Aluminium und Kupfer als Probenkörpermaterial ist die Einordnung in das Diagramm nicht so eindeutig möglich. Die Schalleistung ist zwar durch den Sensor bestimmbar, für die molare Masse des Metall/Metalloxides in beiden Fällen gilt dies aber nicht.

Um eine Abhängigkeit der Schalleistung von bestimmten Werkstoff- oder Materialeigenschaften, wie sie auszugsweise in Tabelle 4.1 dargestellt sind, festzustellen, muss außer den Grundmaterialien das Gesamtsystem betrachtet werden.

Wenn zwei Metalle gegeneinander reiben, entsteht unter Druck, hoher Temperatur und unter Sauerstoff ein Oxid. Die Oxidationsempfindlichkeit ist von Metall zu Metall unterschiedlich. Aluminium und Kupfer sind zwei Metalle, die schon bei Raumtemperatur beginnen, innerhalb von Mikrosekunden Oxide an der Oberfläche zu bilden und dieser Vorgang wird unter erhöhten Temperaturen, wie z.B. während des beschriebenen Versuchs noch beschleunigt²⁵¹. Im Reibkontakt gibt es also gemischte Kontaktbereiche, die sowohl aus dem nicht oxidierten Reinmetall bestehen, da sie unter Druck und unter Sauerstoffausschluss in Kontakt mit der Gegenfläche sind, als auch Oberflächen, zwischen denen sich z.B. Partikel befinden, die eine Oxidschicht haben. Ebenfalls denkbar ist, dass es Bereiche gibt, bei denen der Anpressdruck nicht so hoch ist, so dass die Oxidschicht nicht durchdrungen werden kann, bzw. Sauerstoff zwischen die Oberflächen kommt und somit diese oxidieren können. In Summe kommt es so zu einer Vermischung aus rein Metallbereichen und oxidierten Bereichen, die alle in Kontakt zur Gegenseite stehen und an der Schallerzeugung somit beteiligt sind. Das Verhältnis zwischen den Bereichen lässt sich jedoch mit heutigen Messmethoden nicht zeitgleich bestimmen, da man nicht online in den Kontakt schauen kann, ohne das Gesamtsystem zu verändern.

Dies führt dazu, dass aufgrund der fehlenden genauen molaren Masse des Kupfer/Kupferoxidgemisch und des Aluminium/Aluminiumoxidgemisch es nur möglich ist, in Abbildung 5.4 den Bereich dazustellen, in dem sich die Messpunkte bewegen können. Dieser Bereich bewegt sich also jeweils zwischen dem reinen Metall, mit geringerer molarer Masse, und dem reinen Oxid, mit höherer molarer Masse.

²⁵¹ (BARGEL & HILBRANS, 2008) S.275

Die vorhergehenden Erkenntnisse lassen nun folgende These zur Abhängigkeit von Material und Körperschall zu:

Mit steigender molarer Masse nimmt die Leistung des Körperschallsignals zu. Bei Kupfer und Aluminium passt die molare Masse des reinen Metalls nicht in die Reihe der übrigen Metalle. Geht man aber von einer Mischung im Reibkontakt aus, erhöht sich die molare Masse und es kommt zu einer Einordnung in die Reihe. Eine Bestimmung des Verhältnisses der Metall/Metalloxide wäre durch den Schnittpunkt der Horizontalen mit der Trendlinie denkbar, allerdings so nicht validierbar.

Da Oxide nur in Sauerstoffumgebung entstehen können, wurde nun zur Überprüfung dieser These der Sauerstoff mit Hilfe eines Edelgases aus dem Reibkontakt gespült. Dies sollte dazu führen, dass die Schalleistung sich auf ca. $0,4 \times 10^{-3} \text{ V}^2$ absenken und auf Höhe der molaren Masse von reinem Kupfer bei 63 g/mol sich wiederfinden lassen sollte. Dies geschah mit Hilfe einer Kapselung am TRM 1.0 aus Aluminiumprofilen und Folie, so dass der Bereich um den Reibkontakt gegen den Rest des Raums isoliert wurde. Der Bereich um den Reibkontakt wurde mit Argon geflutet und beobachtet, wie sich das Schallsignal verhält. Argon ist das einzige Edelgas, mit dem noch keine chemische Verbindung mit einem anderen chemischen Stoff nachgewiesen wurde²⁵². Somit ist Argon das reaktionsträgste Edelgas, das bekannt ist. Die Zufuhr des Argons und der Restsauerstoffgehalt wurden mit Hilfe einer Lambda-Sonde kontrolliert und gesteuert.

²⁵² (ANS u. a., 1992)

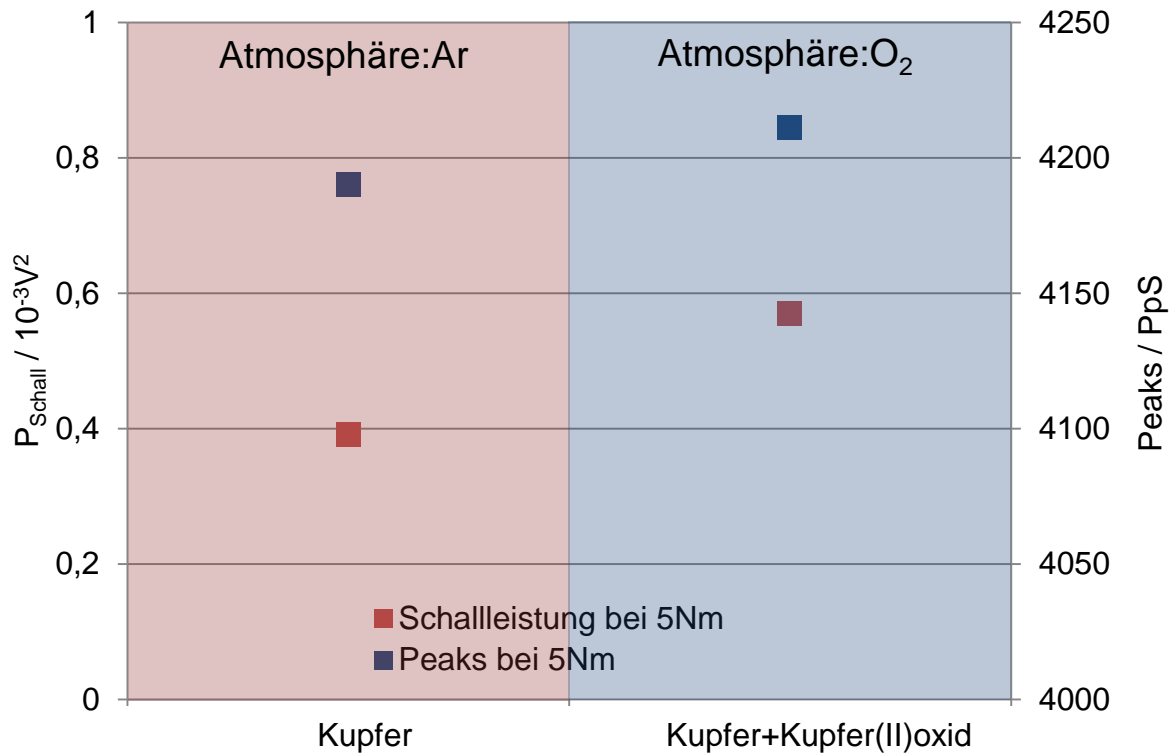


Abbildung 5.5: Schallleistung von Kupfer in Luft-Umgebung und in Argon-Umgebung

Wie in Abbildung 5.5 zu erkennen, sinkt unter Argon Atmosphäre das Schallsignal auf $0,39 \times 10^{-3} \text{V}^2$. Durch die unterbundene Oxidbildung im Kontakt sind die entstehenden Partikel weicher. Die geringere Partikelanzahl über der Zeit ist zudem ein Indiz für weniger abgeriebene Partikel und einen veränderten Verschleißmechanismus. Aufgrund der fehlenden Oxidschicht und des weicheren Kupfers kommt es im Reibkontakt des WFPs zu Adhäsion und weniger zu Abrasionsvorgängen, wie zuvor bei dem Oxid. Dadurch sinkt der Verschleiß und damit auch die Anzahl der Peaks, wie von HASE²⁵³ und JHA²⁵⁴ beschrieben.

GONZALEZ-NUNEZ kommt in seiner Arbeit zu den gleichen Tendenzen bei Aluminium. Er beobachtet die Oxidation von Aluminium mit Hilfe der Körperschallanalyse und stellt dabei fest, dass mit einsetzender Oxidation die Schallintensität wächst und es zur einer vermehrten Peakanzahl kommt²⁵⁵.

Somit lässt sich zusammenfassen, dass die Auswirkungen der Oxidation auf die molare Masse jeweils enorm sind. Durch den hohen Sauerstoffanteil im Oxid kommt es zu einer beträchtlichen Zunahme der molaren Masse. Ist dieser Sauerstoffanteil

²⁵³ (HASE u. a., 2008a)

²⁵⁴ (JHA u. a., 1991);(JHA u. a., 2009a);(JHA u. a., 2009b)

²⁵⁵ (GONZÁLEZ-NÚÑEZ, 2011)

nicht vorhanden, verringert sich sowohl die molare Masse und damit auch das resultierende Schallsignal.

Es zeigt sich also, dass bei der Systembetrachtung der Werkstoffparameter molare Masse sich direkt mit der Körperschalleistung koppeln und eine Abhängigkeit aufzeigen lässt.

In Abbildung 5.6 ist die Anzahl der Peaks pro Sekunde gegenüber den verschiedenen Materialien aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei gleicher Belastung Messing weniger Peaks pro Sekunde gegenüber den anderen Materialien aufweist. Die produzierten Partikel waren zudem deutlich größer und weisen eine andere Struktur auf.

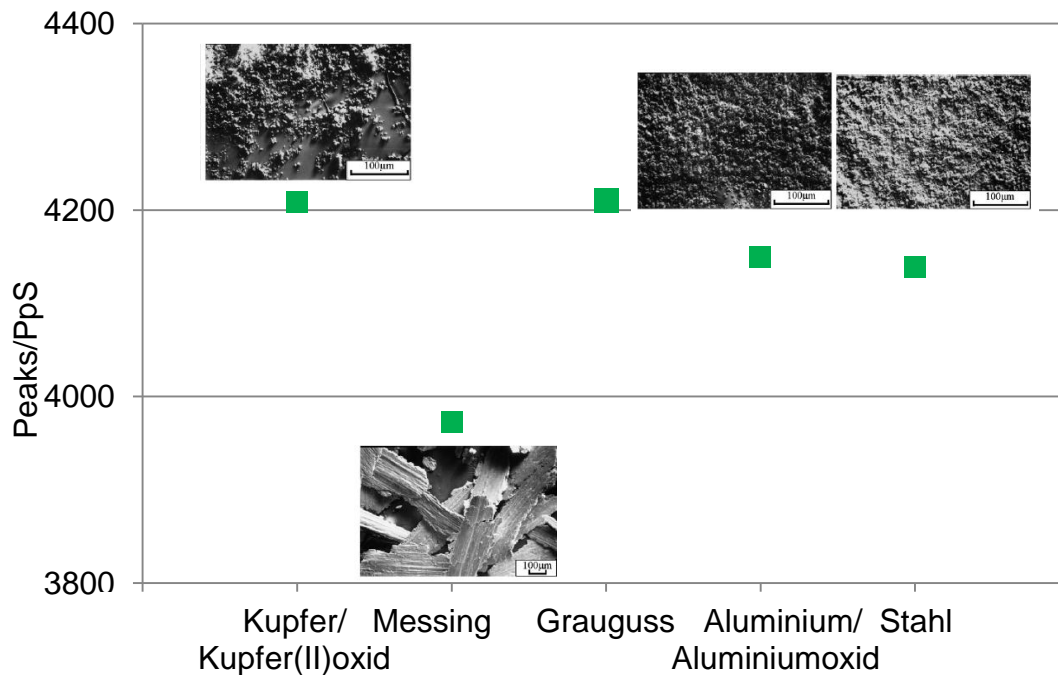


Abbildung 5.6: Die Anzahl der Peaks für verschiedene Materialien und Partikelgrößen der einzelnen Metalle bei Reibung²⁵⁶

Dies verdeutlicht, dass die Anzahl der Peaks pro Sekunde in Abhängigkeit mit der Anzahl der Partikel steht und bestätigt, dass die Ergebnisse im Frequenzbereich von 60-70 kHz die von HASE²⁵⁷ im Frequenzspektrum von 0-2 Mhz untersuchten Phänomene reproduzieren.

Vergleicht man das Verschleißvolumen von Messing und der anderen Metalle, so sind die entstehenden Verschleißmengen von Kupfer, Aluminium, Grauguss und Stahl annähernd gleich groß. Messing dagegen verschleißt abrasiv deutlich stärker in der gleichen Zeit, was sich auch anhand der REM-Aufnahmen erklären lässt, da die einzelnen Messing-Späne um ein vielfaches größer sind als die Partikel der anderen Metalle.

²⁵⁶ Bilderquelle: (HASE u. a., 2008a)

²⁵⁷ (HASE u. a., 2008a)

5.2.2 Einfluss von Verbundwerkstoffen

Zur Verfügung standen zwei unterschiedliche Typen von Verbundwerkstoffreibbelägen, Teilchen- und Faserverbundwerkstoffe (siehe Kapitel 4.1.2). Beide wurden in dieser Versuchsreihe wie zuvor bei den Metallen bei 600 UpM und 5 Nm gegen Grauguss gefahren.

In Abbildung 5.7 ist die Schalleistung über der Frequenz des teilchenenthaltenden Reibbelags R-087 dargestellt. Wie bei den Metallen zeigt sich hier ein angeregter Frequenzbereich von 50 und 200 kHz. In diesem Frequenzbereich kommt es zu Matrixreißen und Bruch laut Stand der Forschung²⁵⁸. In Abbildung 5.8 ist die Schalleistung über der Frequenz des faserhaltigen Reibbelags B-8402 zu sehen. Es sind zwei deutlich angeregte Frequenzbänder, zwischen 50 und 200 kHz und 380 und 400 kHz zu erkennen.

Hier kommt es zu einem zweiten angeregtem Frequenzbereich bei 380 kHz bis 400 kHz. Diese Signalcharakteristika legen laut Literatur nahe, dass es beim Faserverbundwerkstoff B-8042 zu einer Anregung auf Grund von Faserbruch im Verbundwerkstoffes kommt. Allerdings wurden diese Erkenntnisse in der Literatur durch Biege und Zugversuche gewonnen²⁵⁹.

Bei Biege- und Zugversuchen werden die Fasern abgerissen und aus dem Material herausgezogen, Um abzuklären, ob in den hier durchgeführten Versuchen dieselben Mechanismen auftreten, muss geklärt werden, ob es auch zu Abrieb und daher anderen Verschleißformen kommt.

²⁵⁸ (DE GROOT u. a., 1995)

²⁵⁹ (DE GROOT u. a., 1995)

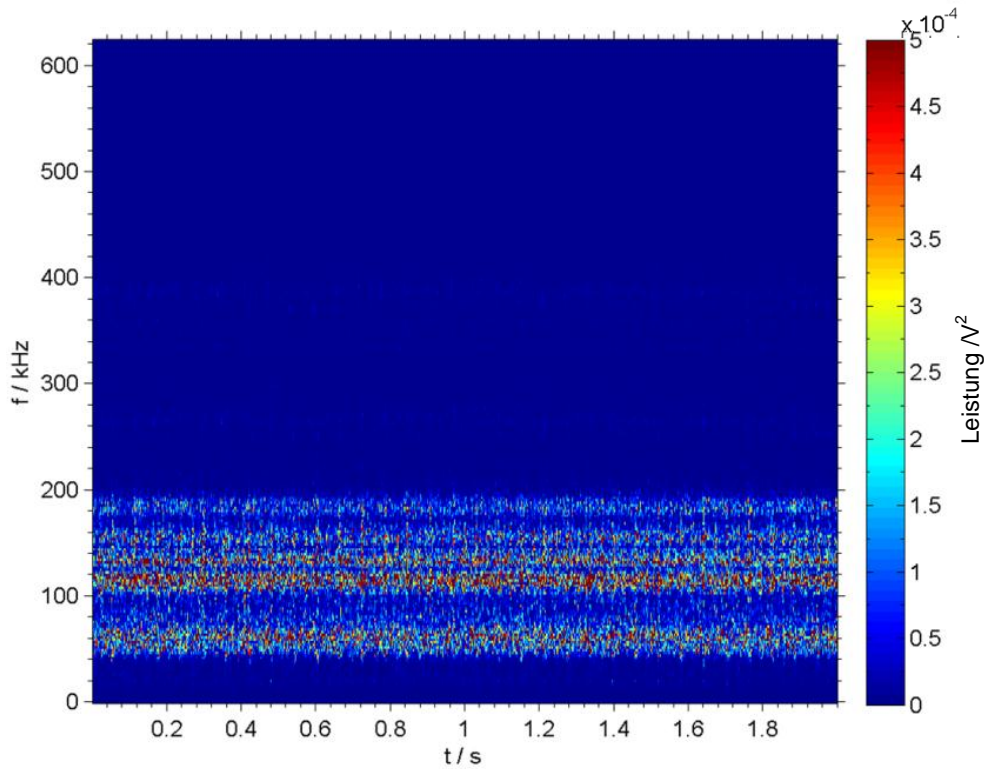


Abbildung 5.7: Spektrogramm Reibbelag R-087

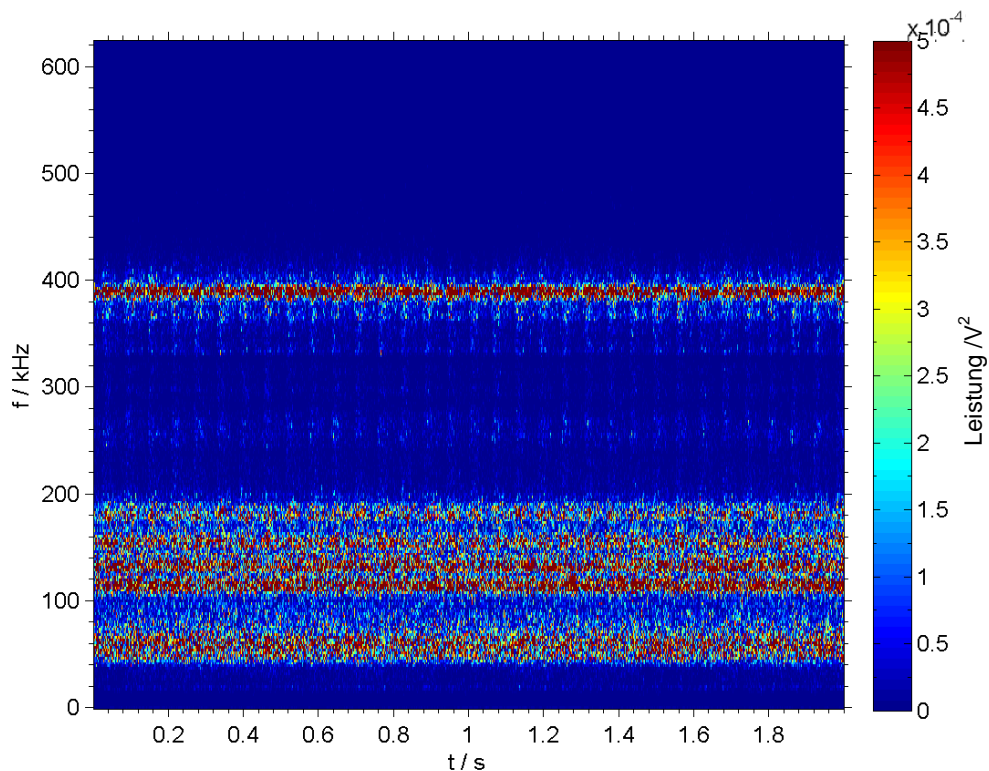


Abbildung 5.8: Spektrogramm Reibbelag B-8042

Aus diesem Grund wurden die Oberfläche und der entstehende Verschleiß mittels REM und Weißlichtinterferometer untersucht. In Abbildung 5.9 links ist zu sehen, dass die Fasern gebrochen, abgerissen und abgeschert, jedoch nicht abgerieben

werden. Sowohl bei den Fasern im Verschleiß, als auch an der Oberfläche rechts in der Abbildung 5.9 ist eine Bruchkante zu sehen. Es ist auch zu erkennen, dass die Fasern an der Oberfläche größtenteils unbeschädigt und nicht abgerieben sind.

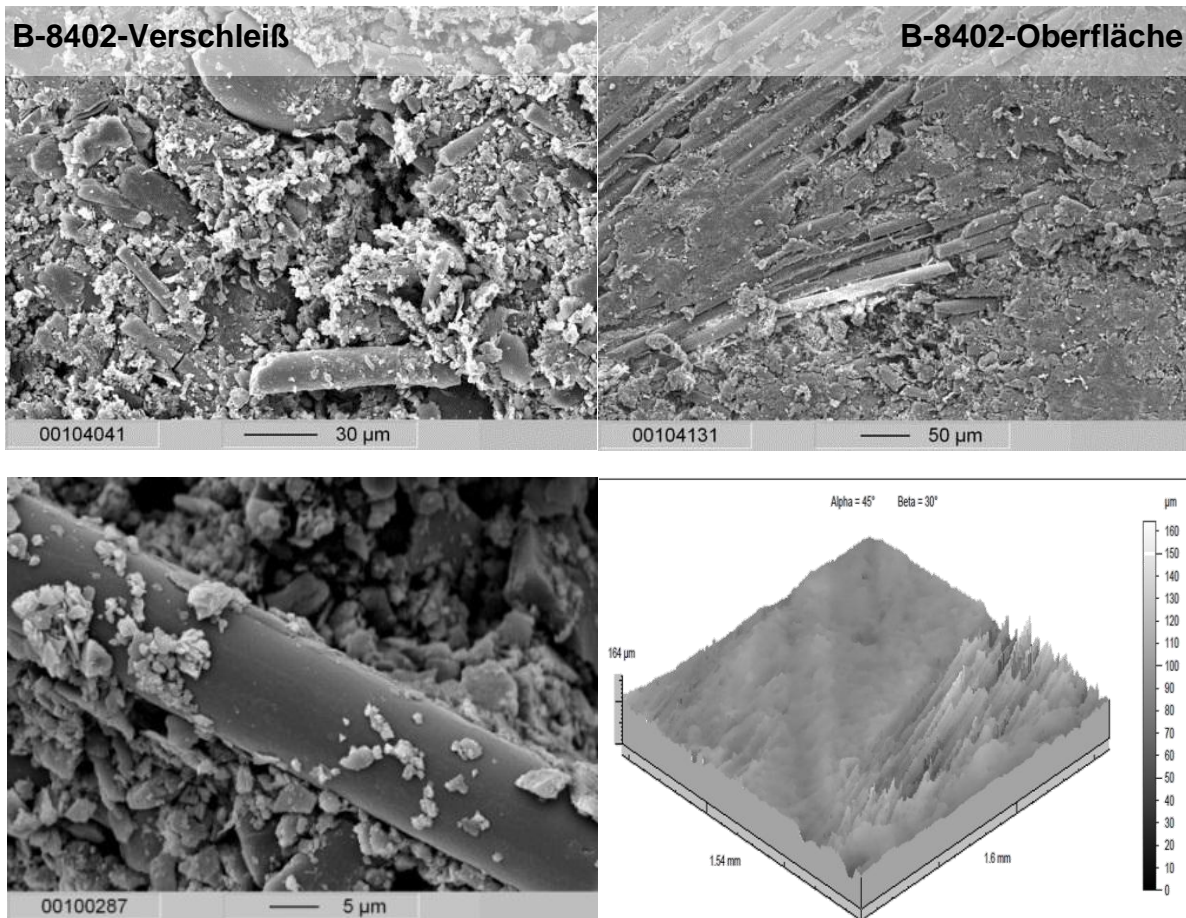


Abbildung 5.9: Verschleiß (links), verschlissene Oberflächen (rechts) und deutlich sichtbare Herauslösung von Fasern sichtbar unter dem REM und Weißlichtinterferometer bei B-8402

In der Aufnahme des Weißlichtinterferometers unten rechts in Abbildung 5.9 ist anhand der Rillen zu sehen, dass es zum Faserauszug kommt. Somit sind die Ergebnisse der Zug- und Biegeversuche mit den gewonnenen Ergebnissen vergleichbar.

Betrachtet man die Schalleistung des Körperschallsignals zwischen 50 und 200 kHz gegenüber Drehmomentschwankungen, dann erkennt man eine unterschiedliche Empfindlichkeit der beiden Materialien (siehe Abbildung 5.10). Dies ist durch das globale Maximum bei 100-110 kHz für R-087 und 120-130 kHz bei B-8402 gekennzeichnet. Beltzer²⁶⁰ beobachtete bei ähnlichen Werkstoffen die Verschiebung zu höheren Frequenzen und eine Amplitudenabsenkung des Maximums.

²⁶⁰ (BELTZER, 1988)

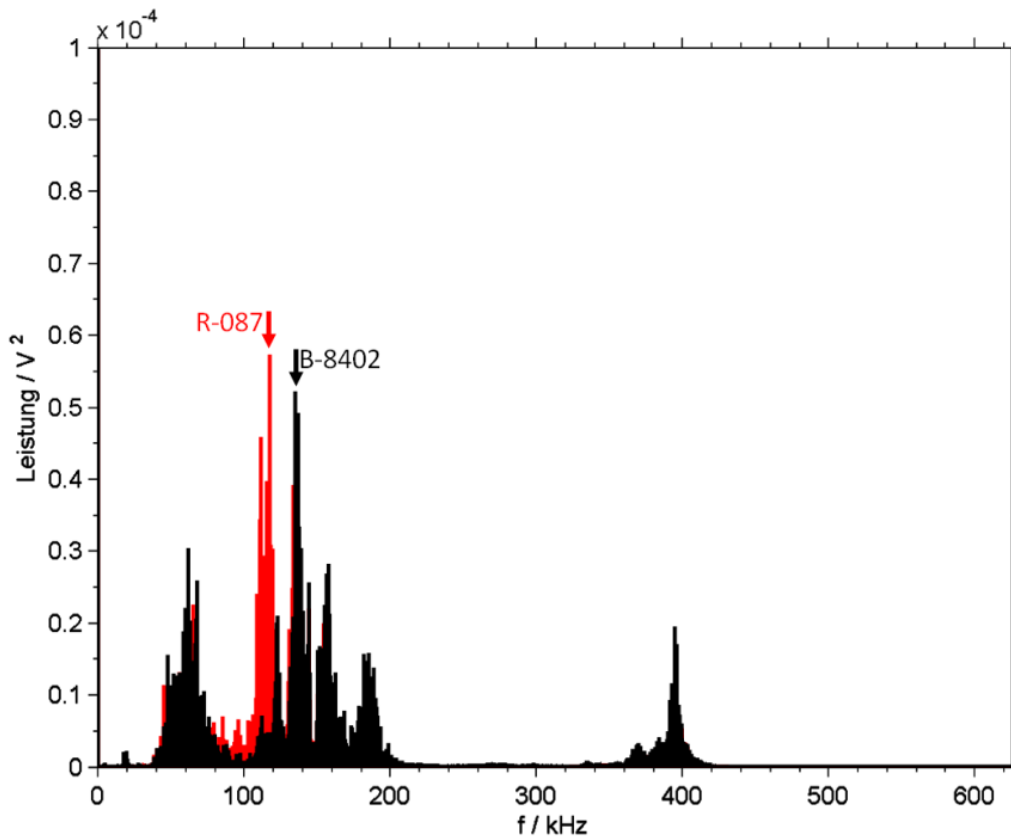


Abbildung 5.10: Verschiebung des globalen Maximums von R-087, Verbundwerkstoff ohne Fasern zu B-8402, Verbundwerkstoff mit Fasern

Zur Erklärung der Amplitudenabsenkung soll nun die These für Metalle überprüft werden. Die quantitative Zusammensetzung der beiden Reibbeläge ist unbekannt, daher lassen sich die molaren Massen hier nicht betrachten. Es lassen sich aber Tendenzen abschätzen:

- Die molaren Massen bei beiden Werkstoffen ist geringer als bei den reinen Metallen, da die organischen Anteile das Gewicht stark senken.
- Der Belag mit Glasfasern hat eine geringere molare Masse, da die Glasfasern im Belag einen Teil der Metalle und der organischen Stoffe ersetzen. Siliziumoxid hat eine sehr geringe molare Masse.

Damit haben beide Verbundwerkstoffe ein deutlich niedrigeres Molekulargewicht, wobei der Faserverbundwerkstoff noch leichter als der Teilchenverbundwerkstoff ist. In Tabelle 5.1 sind die qualitativ abgeschätzten molaren Massen der Schalleistung gegenübergestellt. Hier wird deutlich, dass bei höherer molarer Masse eine höhere Schalleistung als bei Metallen folgt, wie in vorhergehenden Kapiteln gezeigt.

Vergleicht man die Werte von molarer Masse und Schalleistung, dann erkennt man zudem, dass die Werte der Schalleistung bei Metallen um eine Zehnerpotenz höher liegen als bei den Verbundwerkstoffen. Die These, dass die Schalleistung von der molaren Masse als Materialkennwert abhängt wird so gestärkt.

Tabelle 5.1: Ergebnisse nach zwei Stunden Versuch mit konstanten 5 Nm Drehmoment und einer Drehzahl von 600 UpM auf GG25

Belag	Fasern	Molare Masse (g/mol)	Verschleiß (mm ³)	Rauigkeit R _a (μm)	P _{Schall} (10 ⁻³ V ²)
B-8042	Ja	<R-087 & <<Metalle	3,29	5,35	0,029
R-087	Nein	>B-8042 & <<Metalle	3,61	3,10	0,058

Wie ebenfalls Tabelle 5.1 zu entnehmen ist, führen die Fasern zu weniger Verschleiß bei B-8042. Das kommt daher, dass die Fasern die Matrix stärken und zusammenhalten. Es muss, selbst wenn es zu Matrixbruch gekommen ist, erst die Faser gebrochen werden, damit die Matrix aus dem Kontakt gerieben wird. Die Anteile zwischen den Fasern werden allerdings schon früher herausgerieben, was dann zu einer höheren Rauigkeit führt als bei reinen Teilchenverbundwerkstoffen.

Aufgrund des zu vernachlässigten Anteils der Fasern gegenüber der Matrix werden in den folgenden Analysen bei der Betrachtung von Verschleißvolumen der Bereich von 380-400 kHz nicht zu Verschleißuntersuchungen herangezogen.

5.3 Einfluss des Drehmoments auf das Schallsignal

Da vor allem neben der Reibgeschwindigkeit auch die Normalkraft einen Einfluss auf das Verschleißverhalten des Reibkontakts hat²⁶¹, wird nun die Belastung variiert, indem das Drehmoment variiert wird. Hierbei wird jeweils der Einfluss auf die Schalleistung und die Peakanzahl pro Sekunde untersucht, sowie das Verschleißvolumen bestimmt und Oberflächenparameter charakterisiert. Anschließend werden die Ergebnisse mit den Aussagen aus der Literatur bei Stift-Scheibe-Tribometern verglichen.

Bei jedem abgebildeten Punkt für die Anzahl der Peaks pro Sekunde und die Schalleistung in den folgenden Diagrammen handelt es sich um Mittelwerte aus 720 Einzelmessungen über eine Versuchszeit von jeweils zwei Stunden. Neben den beiden Verbundwerkstoffen wurden für die Verschleißuntersuchungen Kupfer und Aluminium gewählt. Bei allen anderen Metallen versagte die Klebung auf Grund der

²⁶¹ (KLAMECKI & HANCHI, 1990)

zu hohen Temperaturen nach einer gewissen Zeit, wodurch das Pellet sich vom Träger löste.

5.3.1 Einfluss bei Metallen

Mit Erhöhung des Drehmoments von 5 Nm auf 10 Nm steigt die Amplitude der Schallleistung und die Anzahl der Peaks im betrachteten Bereich bei Kupfer als auch Aluminium an (siehe Abbildung 5.11). Aus der Kombination sowohl steigender Schalleistung und höherer Peakanzahl pro Sekunde lässt sich schließen, dass es bei höherem Drehmoment auch zu verstärktem Verschleiß kommen müsste. In Tabelle 5.2 sind die Verschleißwerte für Kupfer und Aluminium dargestellt.

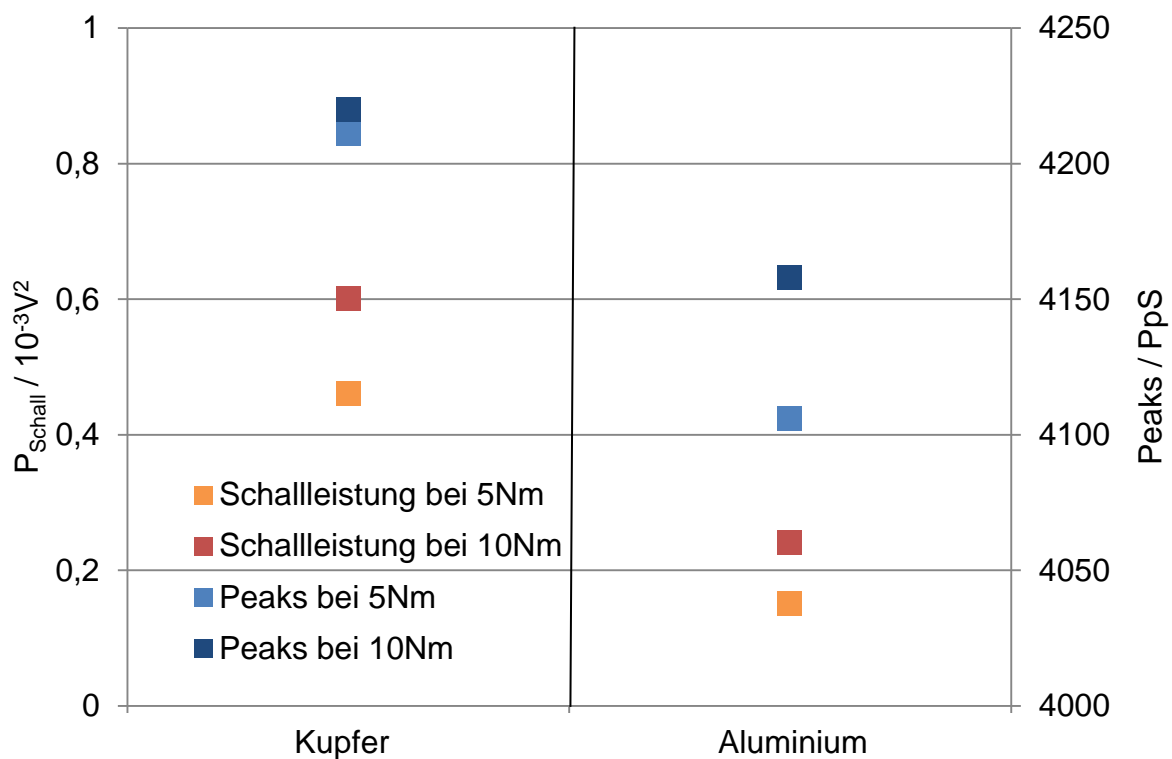


Abbildung 5.11: Schalleistung und Peak-Verteilung bei sich änderndem Drehmoment

Die aufsummierten R_a -Werte von Gegenreibrscheibe und den Pellets steigen auch mit der Anzahl der Peaks, wie von HASE U.A. beschrieben für Metalle und sind bei den homogenen Gefügestrukturen des Metalls ein Indiz für die Rauigkeit des Metalls²⁶².

²⁶² (HASE u. a., 2008a)

Tabelle 5.2: Gemessene R_a -Werte und Verschleiß über dem Drehmoment bei Kupfer und Aluminium

	Kupfer		Aluminium	
Drehmoment (Nm)	5	10	5	10
Peaks (PpS)	4211	4226	4105	4160
R_a -Werte GRS+ P. (μm)	4,91	5,35	7,63	10,52
Verschleiß GRS + P. (μm^3)	1250	1635	1320	1860

Die Erkenntnisse aus Kapitel 2.7.2 mit Stift-Scheibe-Tribometern können somit auf den TRM bei Metallen übertragen werden.

5.3.2 Einfluss bei Verbundwerkstoffen

Im Folgenden wurden die Versuche mit denselben Parametern an Verbundwerkstoffen durchgeführt.

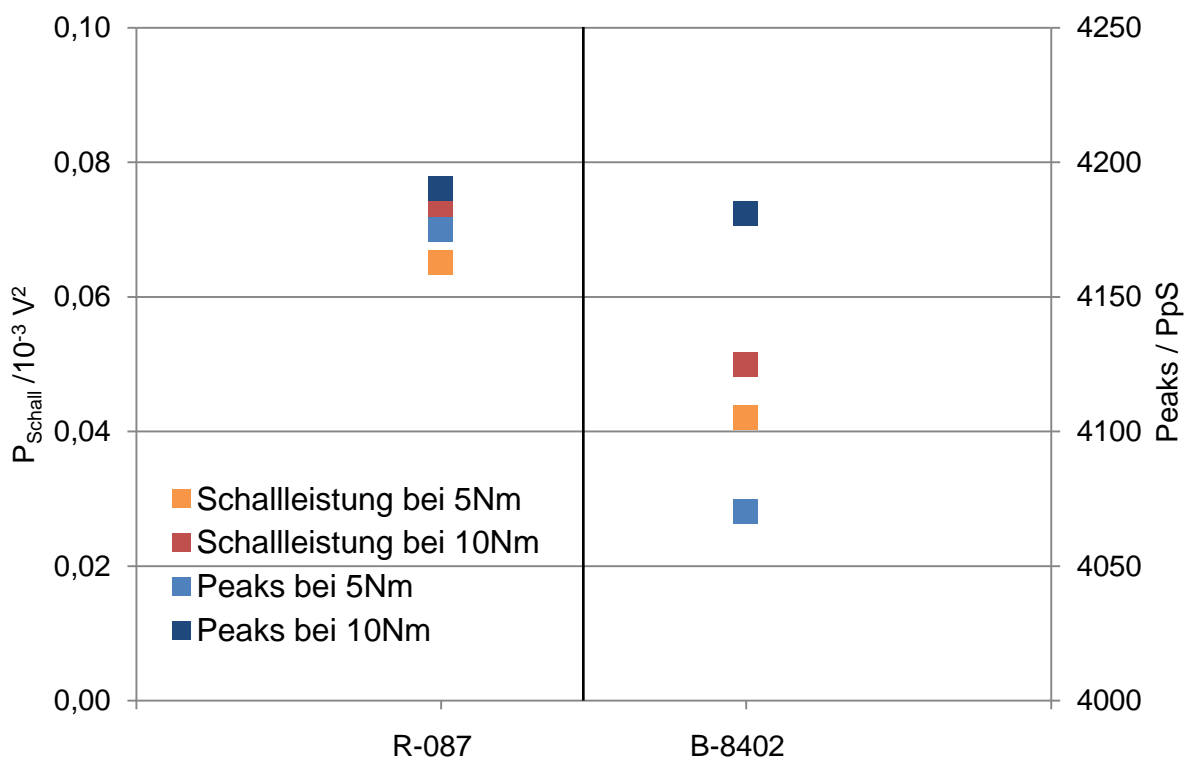


Abbildung 5.12: Schalleistung und Peak-Verteilung bei sich änderndem Drehmoment

In Abbildung 5.12 sind die Schalleistung und die Peaks pro Sekunde von R-087 und B-8402 bei einem Drehmoment von 5 Nm und 10 Nm zu sehen. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass mit steigendem Drehmoment sowohl die Schalleistung, als auch die Anzahl der Peaks pro Sekunde steigen. Wie in Tabelle 5.3 zu sehen, steigt auch der

Verschleiß mit dem Drehmoment bei beiden Materialien. Im Vergleich zum Reibbelag R-087 ohne Fasern verschleißt der B-8402 mit Fasern nicht so stark, wie bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben.

Tabelle 5.3: Gemessene R_a -Werte und Verschleiß aus Reibversuchen mit Verbundwerkstoffen

	R-087		B-8402	
Drehmoment (Nm)	5	10	5	10
Peaks (PpS)	4175	4190	4070	4181
R_a -Werte GRS+P. (μm)	3,16	2,63	5,35	2,95
Verschleiß GRS+P. (μm^3)	3,31	3,73	3,02	3,71

Im Gegensatz zu Metallen sinkt hier der R_a -Wert mit steigendem Drehmoment entgegen der Anzahl der Peaks pro Sekunde. Die Korrelation zwischen der Anzahl der Peaks und dem arithmetischen Mittenrauheitswert lässt sich hier also bei Drehmomenten-Variation auf Verbundwerkstoffe nicht übertragen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Peaks zusammen mit der Schalleistung dem Verschleiß folgen. Bei Metallpaarungen verursacht eine höhere Normalkraft eine höhere lokale Pressung, was dazu führt, dass auch größere Partikel herausgerissen werden.²⁶³ Dadurch erhöhen sich dann der Verschleiß und auch die Rauheit der Oberfläche.

Bei Verbundmaterialien ist die Maximalgröße der Partikel jedoch zum großen Teil durch die Größe der einzelnen Bestandteile des Verbundmaterials bestimmt. Da in einem homogenen Verbundwerkstoff die Anteile an sich schon eine gewisse Größe haben, definiert die Größe der einzelnen eingelagerten Inhaltsstoffe die Größe der späteren Verschleißpartikel. Bei geringerem Anpressdruck werden die einzelnen Bestandteile aus dem Verbundwerkstoff gerieben, was zu einer recht hohen Rauigkeit führt. Steigt der Druck auf die Kontaktfläche führt das dazu, dass nicht nur ganze eingelagerte Partikel herausgerieben werden, sondern dass diese Partikel auch partiell herausgerieben werden. Dies bewirkt dann die geringere Rauigkeit an der Oberfläche.

Die Fasern im Verbundwerkstoff wirken diesem Vorgang entgegen. Dies führt insgesamt zu weniger Matrixbrechen und Verschleiß bei B-8402 und damit auch zu weniger Peaks über der Zeit. Aufgrund der Fasern steigt die Rauheit der Oberflächen, da erst die weichen Matrixanteile aus den obersten Schichten gerieben

²⁶³ (KLAMECKI & HANCHI, 1990)

werden und die Fasern zurückbleiben. Die Fasern verhindern, dass Matrixmaterial aus den unteren Bereichen, die eventuell auch schon gebrochen ist, als Verschleiß aus dem Kontakt befördert wird. Hier muss erst noch also die Faser gebrochen und damit überwunden werden. Durch die Steifheit der Fasern steigt die Verschleißrate schneller bei höheren Belastungen und es wird mehr Matrixwerkstoff und Fasern aus dem Material befördert im Gegensatz zu R-087.

Eine Übertragbarkeit der Verschleißvolumenerkennung von Metallen hin zu Verbundwerkstoffen in dem schmalen Frequenzband von 100-110 kHz bei R-087 und 120-130 kHz bei B-8042 ist also möglich. Die Anzahl der Peaks und die Schallleistung korreliert wie zuvor bei den Metallen mit dem Verschleißvolumen.

5.4 Einfluss der Drehzahl auf das Schallsignal

Ein weiterer Einfluss auf das Verschleißverhalten und damit auf die Schallleistung des Körperschallsignals stellt die Gleitgeschwindigkeit dar. In dieser Versuchsanordnung wird die Gleitgeschwindigkeit nicht in m/s angegeben, sondern aufgrund der Gegebenheiten in Umdrehungen pro Minute (UpM). Die Ergebnisse bei den Körperschallkurven sind ebenfalls gemittelte Messwerte aus 720 einzelnen Messwerten. Die Versuche wurden hier genauso mit Kupfer und Aluminium durchgeführt, da bei den anderen Metallen bei Drehzahlen ab 1000 UpM die Klebung versagte und keine reproduzierbaren Ergebnisse erhalten werden konnten.

5.4.1 Einfluss bei Metallen

In den folgenden Versuchen wurde die Drehzahl bei konstanter Belastung variiert. Nach jedem Versuch wurden wieder die R_a -Werte und der Verschleiß mit Hilfe des Weißlichtinterferometers offline nach jedem Versuch gemessen. In Tabelle 5.4 sind die Ergebnisse der Drehzahlvariation bei Metallen dargestellt.

Tabelle 5.4: R_a Werte, Verschleiß und Anzahl der Peaks pro Sekunde bei Kupfer im Vergleich zur Drehzahl bei konstantem Drehmoment

Drehzahl (UpM)	600	800	1000	1200
Anzahl Peaks (PpS)	4211	4209	4193	4172
R_a -Werte GRS+ Cu (μm)	4,91	4,81	4,39	4,34
Verschleiß GRS+Cu (mm^3)	1276	720	491	237

Auch der Verschleiß sinkt mit steigender Drehzahl exponentiell von 600 UpM zu 1200 UpM von $1276 \mu\text{m}^3$ auf $237 \mu\text{m}^3$. In Abbildung 5.13 erkennt man, dass bei Kupfer die Schallleistung mit steigender Drehzahl steigt, die Peaks pro Sekunde

jedoch abnehmen. Hier korreliert die Anzahl der Peaks pro Sekunde also mit dem Verschleiß; die Schalleistung jedoch nicht. Zu dieser Erkenntnis gelangte auch KLAMECKI U.A.²⁶⁴ und STAR U.A.²⁶⁵. Da jedoch aus Lastvariationen bekannt ist, dass die Schalleistung mit dem Verschleiß korreliert²⁶⁶, muss die steigende Schalleistung eine andere Ursache haben. KLAMECKI U.A. begründet das mit steigender Drehzahl die Anzahl der Brüche im Material steigen, aber nicht alle Brüche zu Verschleiß führen. Damit kommt es bei steigender Drehzahl zu erhöhten Schallamplituden und gleichzeitig zu geringerem Verschleiß bei steigender Drehzahl.

Die Abnahme der Peaks korreliert mit der Abnahme der summierten Rauigkeiten (siehe Tabelle 5.4), wie aus dem Stand der Forschung bekannt. Dies liegt daran, dass bei steigender Drehzahl Mikrorauigkeiten einen verminderten Einfluss auf die gegnerische Oberfläche haben und es zu weniger Furchungverschleiß kommt.

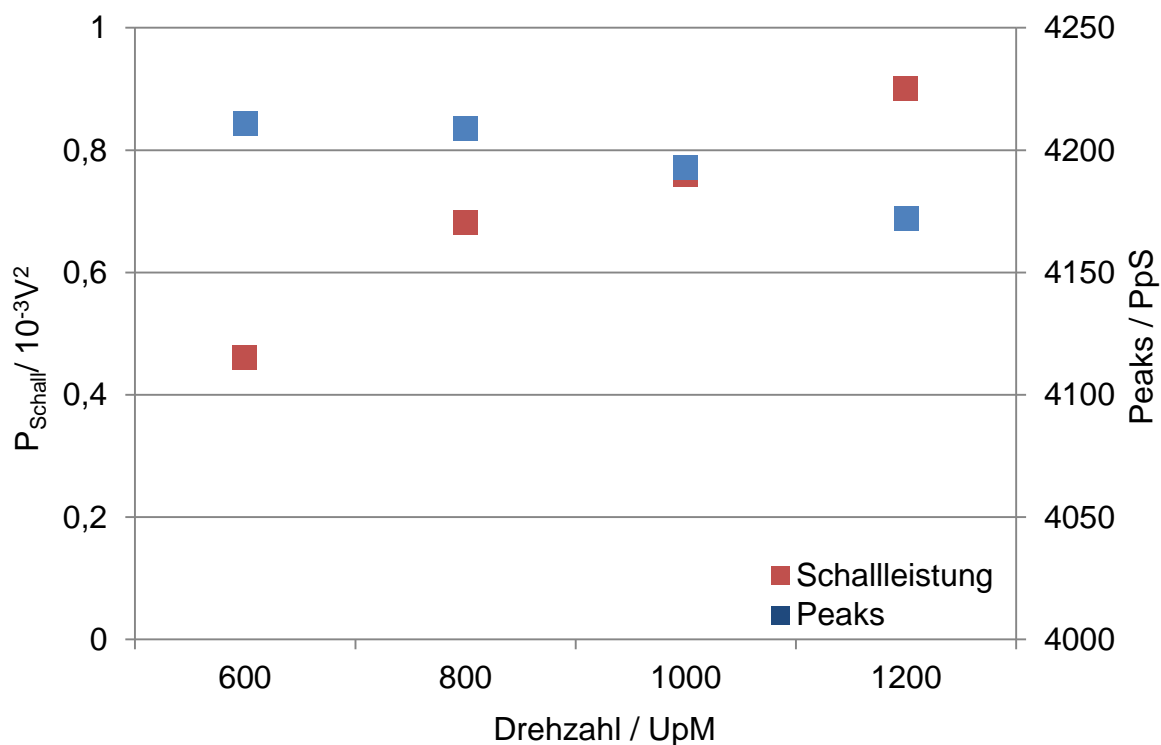


Abbildung 5.13: Durchschnittliche Schalleistung und Anzahl Peaks pro Sekunde bei Kupfer über der Drehzahl

Rauhigkeitsspitzen werden somit gekappt und die beiden Oberflächen insgesamt geglättet. Bei Aluminium zeigen sich dieselben Tendenzen in der Schalleistung und in der Anzahl der Peaks pro Sekunde.

²⁶⁴ (KLAMECKI & HANCHI, 1990)

²⁶⁵ (STARR & RAO, 2001)

²⁶⁶ (KLAMECKI & HANCHI, 1990)

Zusammenfassend bedeutet das, dass bei der Variation der Drehzahl die bisherigen Erkenntnisse nach Stand der Forschung für Metalle an diesem Prüfstand bestätigt werden können und eine Übertragbarkeit gegeben ist.

5.4.2 Einfluss bei Verbundwerkstoffen

Bei den Versuchen mit Verbundwerkstoffen wurde wie im Kapitel zuvor beschrieben bei konstantem Drehmoment von 5 Nm die Drehzahl variiert.

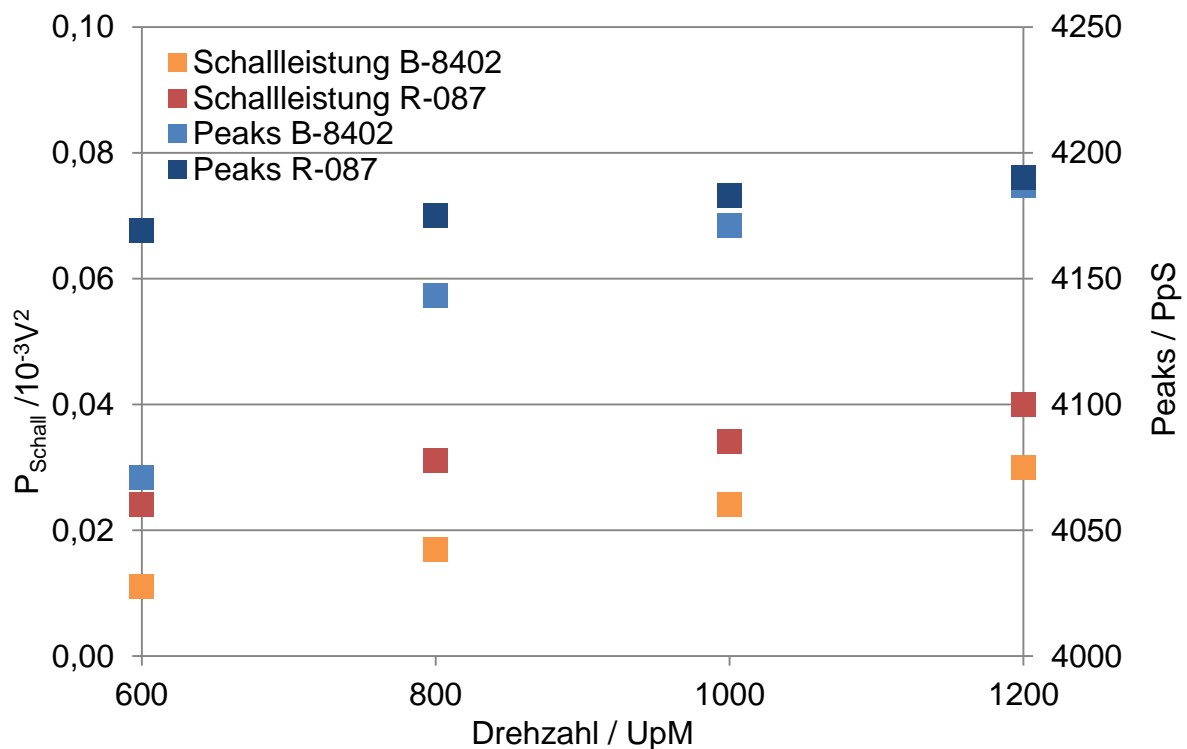


Abbildung 5.14: Durchschnittliche Schalleistung und Anzahl Peaks pro Sekunde bei R-087 und B-8402 über der Drehzahl

In Abbildung 5.14 ist die Schalleistung und die Peakanzahl pro Sekunde bei unterschiedlichen Drehzahlen des Reibbelags R-087 und B-8402 auf Grauguss zu sehen. Mit steigender Drehzahl steigen Schalleistung und Peakanzahl kontinuierlich. Zusätzlich wurden hier ebenfalls die R_a -Werte und der Verschleiß mit Hilfe des Weißlichtinterferometers offline bestimmt. Aus Tabelle 5.5 wird ersichtlich, dass die Anzahl der Peaks mit dem Verschleiß und mit steigender Verschleißrate steigt, hier aber die R_a -Werten sinken. Eine Erklärung ist hierfür der Aufbau des Materials. Anders als bei Metallen ist die verbindende Kraft zwischen den Bestandteilen des Verbundwerkstoffes nicht so hoch, wie die Ionenbindung bei den Metallen. D.h. es ist wesentlich einfacher, Partikel im Verbundwerkstoff voneinander zu trennen, als bei Metallen, wo die Bindung viel größer ist und wesentlich mehr Energie aufzuwenden ist.

Somit steigen hier Schalleistung und Peakanzahl über der Zeit und sind eng mit der Verschleißrate und dem Volumenverschleiß verbunden.

Der Unterschied zwischen den beiden Arten von Verbundwerkstoffen ist in der Veränderung der Anzahl der Peaks und dem Verschleiß besonders deutlich. Es ist deutlich zu sehen, dass die Peaks pro Sekunde beim Faserverbundwerkstoff immer kleiner sind, als beim Partikelverbundwerkstoff, genauso wie auch das Verschleißvolumen beim Faserverbundwerkstoff geringer ausfällt. Die R_a -Werte sind bei B-8402 auf Grund der Fasern höher als bei R-087. Bei beiden Materialien sinken die R_a -Werte mit steigender Drehzahl aufgrund des sinkenden Einflusses von Mikrorauhigkeiten.

Tabelle 5.5: Vergleich Anzahl Peaks und aufsummierte R_a -Werte für die Verbundwerkstoffe R-087 und B-8402

Drehzahl (UpM)	600	800	1000	1200
Peaks (PpS) R-087	4169	4175	4183	4190
R_a -Werte GRS+ R-087 (μm)	5,11	4,78	4,68	4,56
Verschleiß GRS+ R-087 (μm^3)	404	768	825	1048
Peaks (PpS) B-8402	4070	4143	4171	4186
R_a -Werte GRS+ B-8402 (μm)	11,95	10,85	7,76	7,22
Verschleiß GRS+ B-8402 (μm^3)	268	643	753	774

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die Ergebnisse aus den Metallversuchen auf die Versuche mit Verbundwerkstoffe nicht komplett übertragen lassen. Der Zusammenhang zwischen Verschleiß und Schalleistung ist gegeben, die Korrelation von Anzahl von Peaks pro Sekunde mit den R_a -Werten jedoch nicht. Hier ist der Unterschied des Materialaufbaus von einer homogenen metallischen Gitterstrukturen zum diffusen Teilchenaufbau bzw. der Faserstruktur und deren Bindung zu groß. In der theoretischen Betrachtungsweise wird bei Verbundwerkstoffen zwar von idealen und gleichverteilten Teilchen im Material ausgegangen, dies trifft jedoch wie in der REM-Aufnahme des Schliffbildes in Abbildung 4.2 zu sehen ist, nicht zu. Der Aufbau beeinflusst wiederum signifikant das Verschleißverhalten und damit das Körperschallsignal. Peaks und Schalleistung folgen bei Verbundwerkstoffen der Verschleißrate und dem Verschleißvolumen.

5.5 Einfluss der Geometrie auf das Schallsignal

Im Gegensatz zu bisherigen Körperschalluntersuchungen an Stift-Scheibetriebometern, bei denen Stift und Körperschallsensor relativ zueinander keine Bewegung vollführten, ist es bei diesen Versuchen möglich, auch geometrische Einflüsse von Körpern auf das Signal zu detektieren, da Pellet und Sensor sich aneinander vorbei bewegen.

Bisherige Untersuchungen aus der Literatur nutzten Stift-Scheibe-Tribometer mit einer Spitze von 2-5 μm die sich auf einer drehenden Scheibe bewegte. Der Sensor war hierbei entweder hinter dem Stift angebracht und detektiert über die gesamte Versuchszeit kontinuierlich ein Signal.²⁶⁷, oder er war zwar auf der Gegenreibe montiert, ohne jedoch auf den geometrischen Effekt einzugehen²⁶⁸.

Bei den Versuchen in dieser Arbeit, ist der Sensor am Rande einer stehenden Scheibe montiert und das Pellet (gleichzusetzen mit dem Stift) bewegt sich auf einer kreisförmigen Bahn. Dabei ist zu beobachten, dass beim Passieren des Pellets am Sensor das Körperschallsignal an- und abschwilt. Dies ist eine Besonderheit gegenüber bisherigen bekannten Untersuchungen.

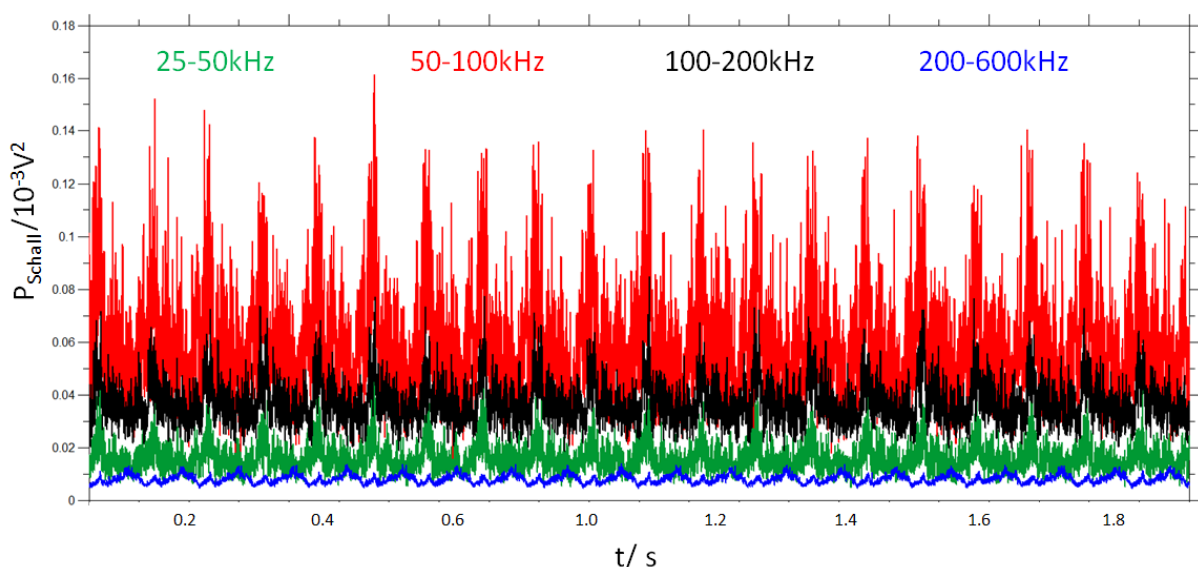


Abbildung 5.15: Körperschallsignal zweier runden Kupferpellets über die Messdauer von zwei Sekunden aufgetragen.

In Abbildung 5.15 ist ein solches Körperschallsignal über der Messdauer von zwei Sekunden aufgetragen. Zu sehen sind hier Frequenzbänder, die ein wiederkehren-

²⁶⁷ Z.B. in (HASE u. a., 2008b); (HANCHI & KLAMECKI, 1991); (JIAA & DORNFELD, 1990)

²⁶⁸ Z.B. in (HASE u. a., 2009); (MIETTINEN & SIEKKINEN, 1996); (SARYCHEV & SHCHAVELIN, 1991)

des An- und Abschwel len des Signals aufweisen und so für ein regelmäßiges Muster im Signal sorgen. Dies legt nahe, dass die Körperschallquelle sich im Körperschallsignal widerspiegelt. Um diese These zu verifizieren, wurde das zu erwartende Körperschallsignal aus der gegebenen Geometrie simuliert.

Wenn sich ein Körper auf einer konstanten Kreisbahn am Sensor vorbeibewegt, dann sollte die Schalleistung an dem Punkt, wo der Reibpartner dem Sensor am Nächsten ist am größten sein. Ebenfalls sollte das Signal bei größerem in Kontakt stehenden Querschnitt steigen und bei kleiner werdendem Querschnitt sinken. Betrachtet man den einfachsten Fall, ein rundes Pellet, sollte das Signal bei der Hälfte des Pellets am lautesten sein, da hier der Pelletquerschnitt am größten und der Abstand zum Sensor am geringsten ist. Zusätzlich folgt die Reibleistung ebenfalls dem Querschnittsverlauf und damit dem Tragprofilverlauf, d.h. sie nimmt auch zu- bzw. ab. Dies ist in Abbildung 5.16 für zwei unterschiedliche Drehmomente bei 5 Nm und 10 Nm zu sehen. Da Reibleistung und Schalleistung korrelieren, müsste das Schallsignal also über dem Querschnitt genauso wie die Reibleistung aussehen.

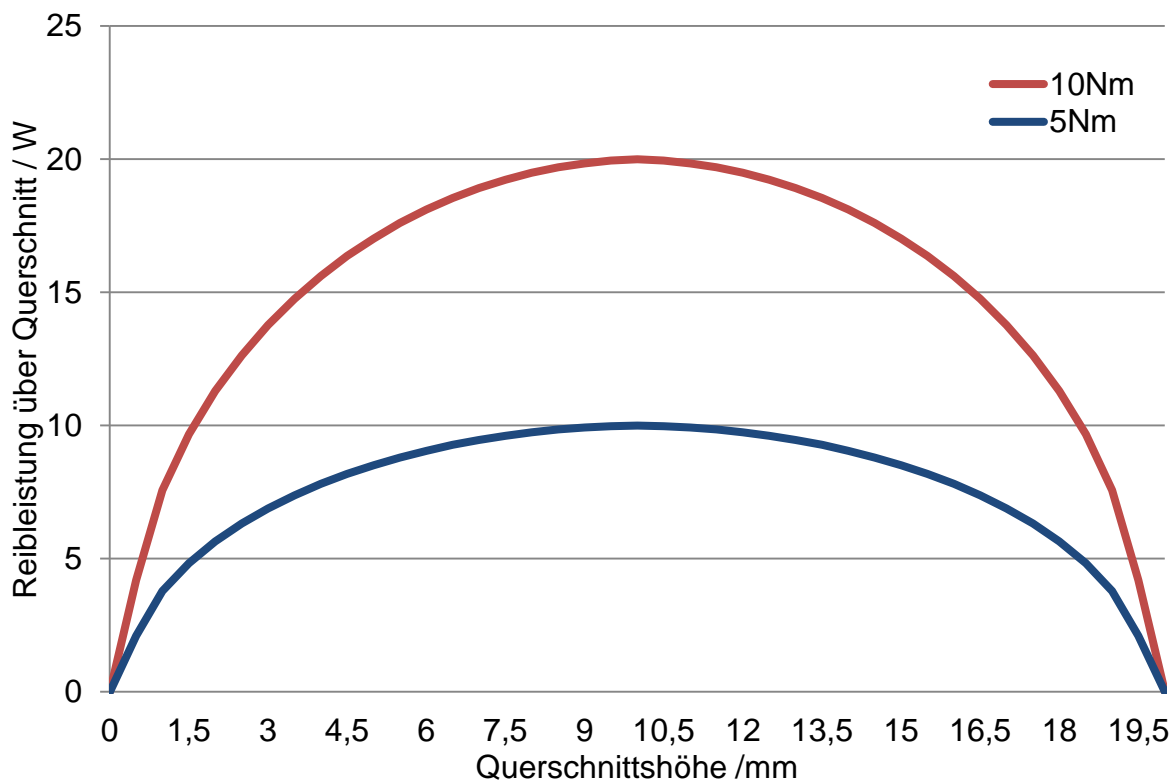


Abbildung 5.16: Reibleistung runder Pellets mit Durchmesser 20 mm über dem Querschnitt bei 5 Nm und 10 Nm aufgebrachten Drehmoments

Im zeitlichen Verlauf ergeben sich beim Passieren des Sensors charakteristische Signalformen in Abhängigkeit der Geometrie und der Geschwindigkeit des Passierens am Sensor. Die Signalamplitudenbreite sollte dabei so lange sein, bis eine zweite Signalquelle die erste Quelle stört. Gemessen an dem gesamten Umfang und der Laufzeit des Pellets teilt sich die Amplitude so mit anderen Schallquellen die

Laufzeit einer ganzen Umdrehung. Hierbei kann es je nach Abstand der Proben zueinander zu Überlappungen im Signal kommen.

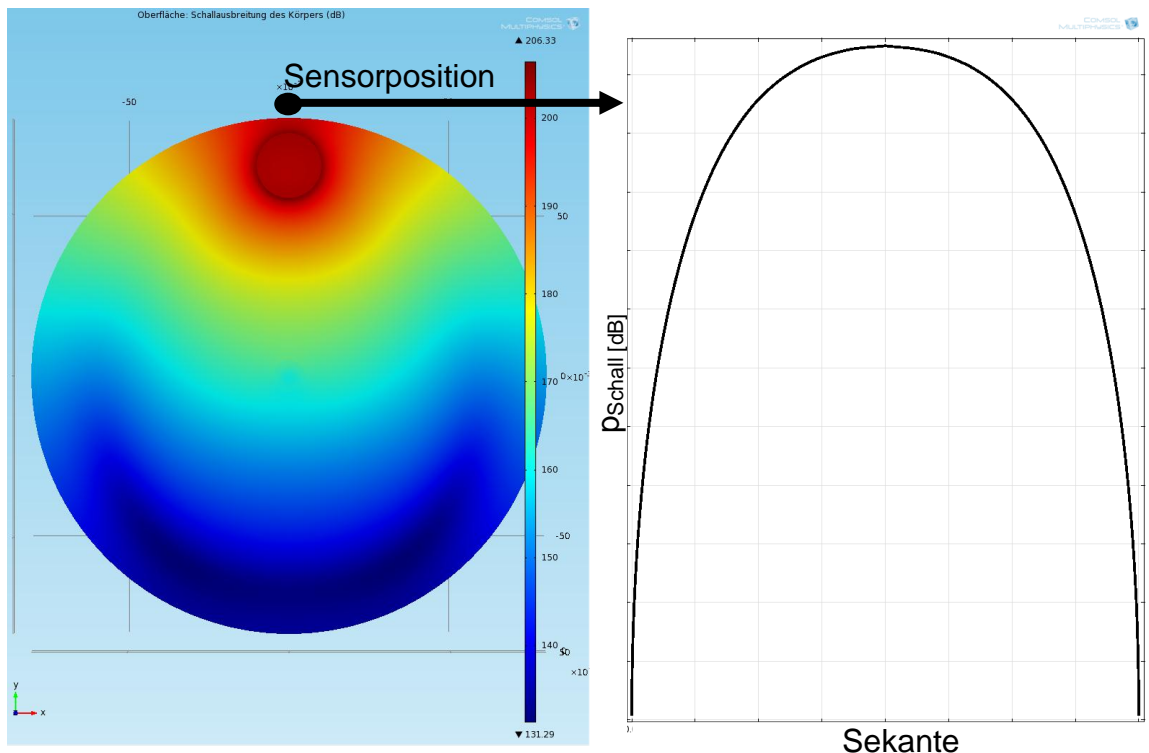


Abbildung 5.17: Schalldruckpegel auf den Reibpartner zu einem bestimmten Zeitpunkt t bei einem runden Pellet. Die Messposition des Körperschallsensors ist direkt vor dem Pellet.

Um diese Zusammenhänge im Experiment überprüfen zu können, ist es nötig, den zu erwartenden Verlauf des Körperschallsignals beim Passieren am Sensor zu kennen. Hierzu wurden Simulationen durchgeführt, in denen ein Schalldruck durch das Pellet auf die Gegenreibscheibe erzeugt wird. Dieser Schalldruck ist äquivalent zu dem Schallsignal, das erzeugt wird, wenn das Pellet über die Scheibenoberfläche reibt.

Die beschriebenen Voraussetzungen in Kapitel 2.9 machen die Ausbreitung von Schallwellen in Festkörpern und vor allem in geometrisch strukturierten Objekten zu einem komplexen und umfangreichen Thema²⁶⁹. Modelle zur Berechnung der Körperschallausbreitung verwenden darum häufig leistungsfähige rechnergestützte Methoden, allen voran die Finite-Elemente-Methode (FEM). Sie haben jedoch gemeinsam, dass der Berechnungsaufwand mit kleiner werdender Wellenlänge, also

²⁶⁹ vgl. (BHATIA, 1985); Eine etwas eingehendere Zusammenfassung der hier angesprochenen Grundlagen gibt z.B. (GROßE, 1996)

steigender Frequenz, stark wächst²⁷⁰. Die Modellierung des gesamten Schwingungsverhaltens von technischen Systemen inklusive der Schwingungs- oder Körperschallerregung macht die Kopplung von Verfahren der Mehrkörpersimulation (MKS)²⁷¹ und FEM erforderlich. Bei der Integration der Körperschallübertragung ist dabei meist eine Simulation der Geräuschabstrahlung in Form von Luftschall von Interesse. Ein typisches Beispiel ist die Ausbreitung von anregenden Quellen wie Verzahnungen über die Lagerstellen auf die letztlich den Luftschall abstrahlende Gehäuseoberfläche. Die FE-Modelle müssen bei der Kopplung stark vereinfacht werden, um mit den zur Verfügung stehenden Rechenleistungen in endlicher Zeit berechnet zu werden. Solche reduzierten Modelle sind jedoch für die Abbildung der Ausbreitung insbesondere hochfrequenten Körperschalls nicht ausreichend detailliert. In der Regel erschweren beispielsweise nicht ausreichend bekannte Dämpfungseigenschaften oder Übertragungsfunktionen sowie Nichtlinearitäten eine übertragbare theoretische Vorherbestimmung²⁷². Aufgrund dieser Einschränkung sind die Ergebnisse im Folgenden qualitativ zu sehen.

Für die Untersuchungen der geometrischen Abhängigkeit der Signalamplitude wurde Comsol Multiphysics 4.2 genutzt. Das Programm basiert auf der Finite-Elemente-Methode (FEM). Neben FEM Berechnungen bietet diese Software die Möglichkeit, durch die Kopplung verschiedener physikalischer Zusammenhänge Simulationen von sich beeinflussenden Phänomenen durchzuführen²⁷³.

Als Vereinfachungen wurden folgende Annahmen bzw. Vereinfachungen getroffen:

- Die Pelletgeometrie und die Gegenreibe liegen ideal glatt aufeinander.
- Der Impedanzunterschied zwischen den zwei Körpern ist null im Gegensatz zur realen Oberflächenbeschaffenheit (siehe Kap 2.9) und hat bei der Betrachtung keinen Einfluss, d.h. der Schalldruck wird im Modell ideal zwischen den zwei Oberflächen weitergegeben. Diese Vereinfachung ist zulässig, da die Impedanz in dem Fall keinen Einfluss auf die Laufzeit und damit auf die Geometrieabhängigkeit des AE-Signals hat.
- Das Wirkflächenpaar Gegenreibe/Pellet wurde als Schallquelle definiert und ein Wert von 1000 W/m zugewiesen.

²⁷⁰ vgl. (SARRADJ, 1998)

²⁷¹ z.B. (TKACHUK u. a., 2009)

²⁷² vgl. z.B. (KOLLMANN, 1999), S. 119

²⁷³ (COMSOL, 2011)

Die Schallwellen im verlustfreien Körper wurden nach folgender Formel für den akustischen Druck p simuliert:

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} (\nabla p - q) \right) = Q \tag{5.1}$$

Dabei bezeichnet ρ (SI Einheit: kg/m^3), die Dichte, und c (SI Einheit: m/s) ist die Schallgeschwindigkeit im Körper.

Als Geometriekörper wurden Quader, Zylinder und ein Kreissegment gewählt. Das Kreissegment ist so gebogen, dass der Körper ideal auf der Kreisbahn liegt. Die Kanten sind dabei so angeschrägt, dass es am Anfang und am Ende zu einem schlagartigen Ansteigen bzw. Abfall der Signalamplitude kommt. In Abbildung 5.18 sind die idealisierten Geometrien mit ihren Abmaßen der Probenkörper zu sehen.

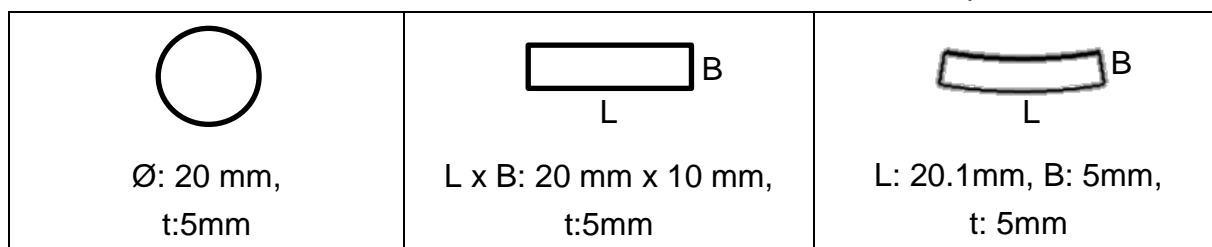


Abbildung 5.18: Geometrie Kreis, Rechteck, Kreisbogen

Die theoretisch entstehenden simulierten Schallamplituden beim Vorbeistreichen der Pelletgeometrien am Sensor und sind in Abbildung 5.19 dargestellt. Hierbei wurde der Schalldruck, welcher mit der Schalleistung gleichzusetzen ist, über der Laufzeit aufgenommen.

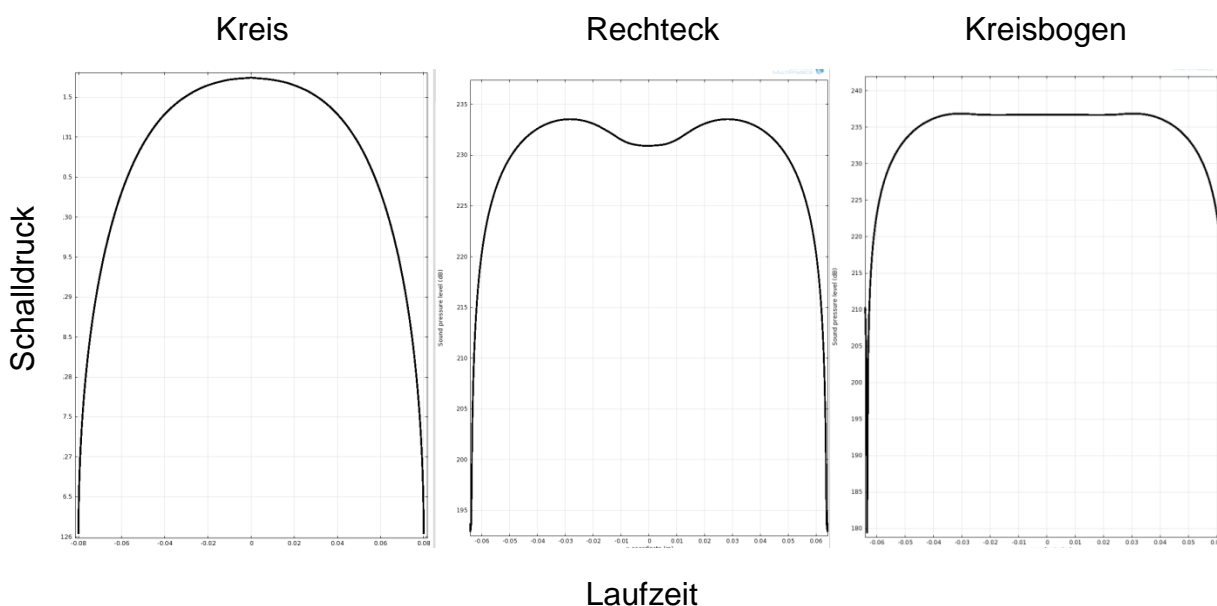


Abbildung 5.19: Theoretische ideale Schallamplitude der Geometrien beim Passieren am Sensor.

5.5.1 Einfluss bei unterschiedlichen Materialien

Zunächst muss wieder geklärt werden, welche Frequenzen für die Analyse des Traganteils des Profils geeignet sind. Für die Betrachtung wurden runde Pellets am TRM 1.0 eingefahren. Das gemessene Schallsignal wurde daraufhin mit dem am Weißlichtinterferometer gemessenen Tragprofilverlauf der runden Pellets verglichen. Bei der Analyse wurde der Tragprofilverlauf immer nur mit dem letzten erhaltenden Körperschallsignal verglichen, als das Pellet am Sensor vorbeikam. Dies ist wichtig, da sich das Tragprofil über der Zeit und damit auch in Abhängigkeit des Weges und der Oberfläche, auf dem das Pellet reibt, kontinuierlich ändert. Theoretisch sollte so sowohl das Körperschallsignal als auch der Verlauf des Tragprofils, wie im Kapitel zuvor beschrieben, der Form des Kreises in Abbildung 5.19 folgen.

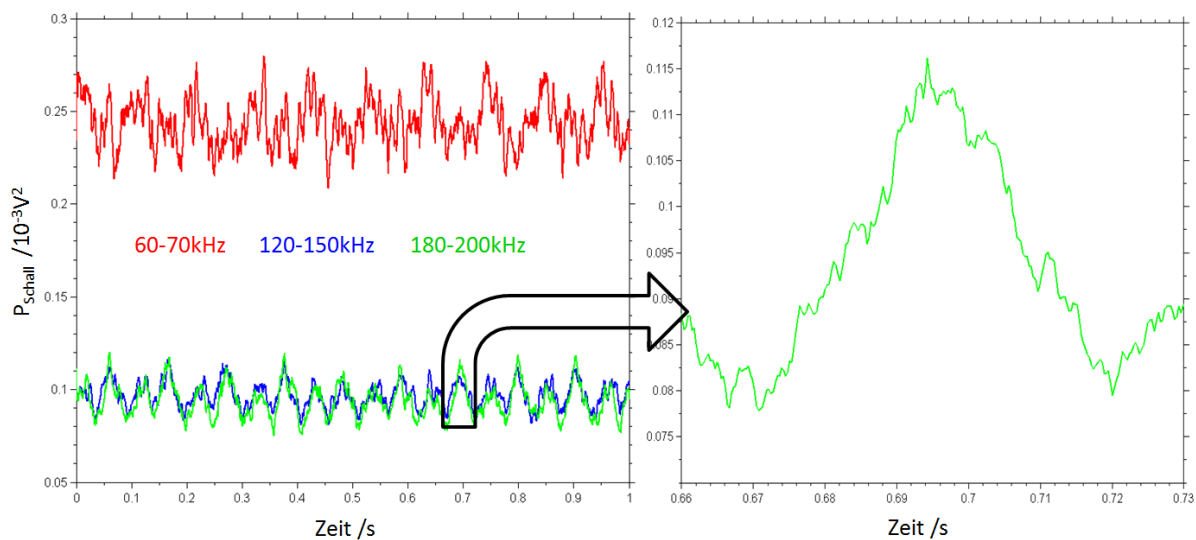


Abbildung 5.20: Schallemissionssignal verschiedener Frequenzbänder bei einem runden Pellet aus Kupfer (links) und des Frequenzbandes von 180-200 kHz.

Schaut man sich in Abbildung 5.20 bei runden gleichmäßig abgeriebenen Kupferpellets die Frequenzbänder zeitabhängig an, erkennt man, dass bei den Signalen um 60-70 kHz kein periodisches Muster zu erkennen ist. Hier sind Einflüsse von Belastung- und Drehzahlvariationen signaldominierend. Je höher allerdings die Frequenz ist, desto klarer werden die wiederkehrenden Muster sichtbar. Vergleicht man die gemessenen Kurven mit den simulierten theoretischen Kurven, dann ist der Bereich von 180-200 kHz am besten geeignet und entspricht am ehesten den theoretisch simulierten Profilen. In diesem Bereich ist das Körperschallsignal markanter und gleichmäßiger und der Einfluss von Verschleiß, Drehzahl und Belastung eher geringer als in den niedrigeren Frequenzen wie z.B. zwischen 60 und 70 kHz.

Aufgrund der nichtglänzenden Oberfläche von organischen Reibbelägen aus Verbundwerkstoffen, ist auf den ersten Blick nicht zu unterscheiden zwischen Bereichen, die während des Reibprozesses getragen haben und Bereichen, die nicht

im Kontakt standen. Da bei metallischen Reibpartnern am Beispiel von Kupfer zuvor die Methode gezeigt wurde, soll nun bei Verbundwerkstoffen überprüft werden, welcher Frequenzbereich geeignet ist, um geometrische Abhängigkeiten mit dem Tragprofil zu korrelieren. Das Vorgehen war hier das gleiche wie bei den metallischen Probekörpern.

Nach einer eingehenden Analyse zeigte sich, dass bei R-087 der Bereich von 180-200 kHz am geeignetsten für den Vergleich mit dem Tragprofil ist. Bei B-8402 zeigte der Bereich von 380-400 kHz das klarste periodische Körperschallsignal.

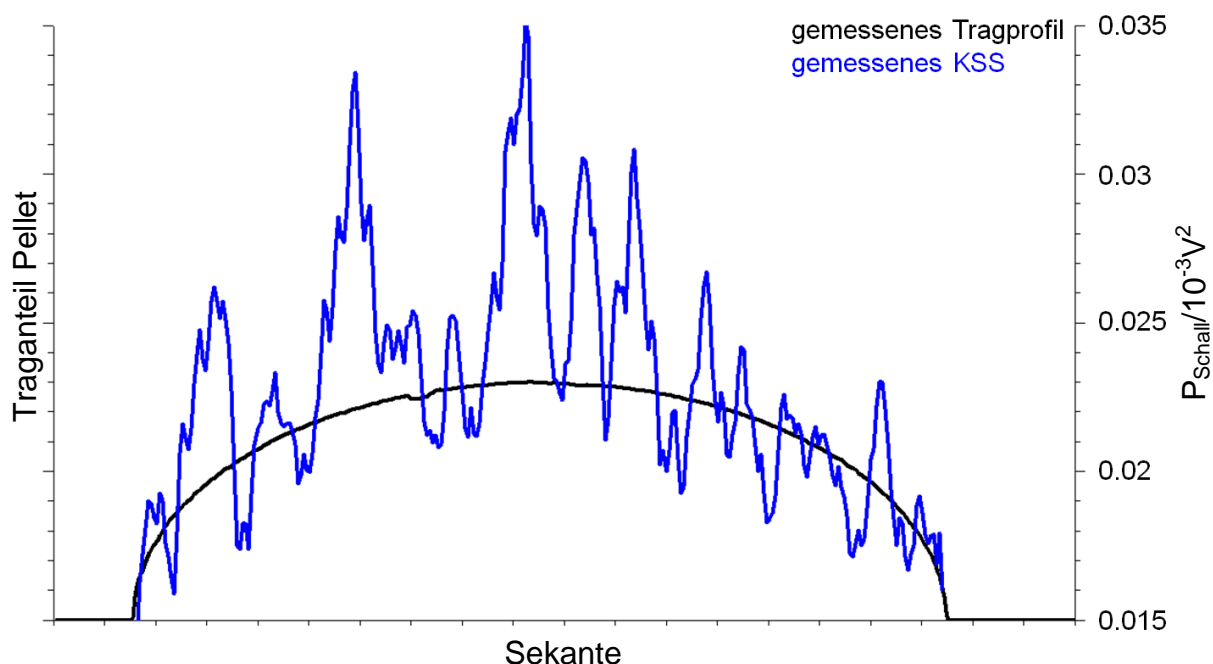


Abbildung 5.21: Kreisquerschnitt: Vergleich Traganteil und gemessenes Körperschallsignal im Bereich von 180-200 kHz bei Composites ohne Fasern (R-087)

In Abbildung 5.21 ist das Körperschallsignal gegenüber dem gemessenen Tragprofil des runden R-087 Pellets aufgetragen. Da die Traganteilkurve eine gleichmäßige symmetrische Parabel darstellt, scheint das Pellet vollständig getragen zu haben. Das gemessene Körperschallsignal folgt dieser Kurve mit recht großen Abweichungen.

In Abbildung 5.22 ist das Körperschallsignal zusammen mit dem gemessenen Tragprofil des Belags B-8402 zu sehen. Auch hier ist sehr gut zu sehen wie die gemessene Körperschalleistung dem gemessenen Tragprofil folgt.

Die Abweichungen in den Signalen, können darauf zurückgeführt werden, dass zwischen den zwei Reibpartnern entstandene Verschleißpartikel zusätzlich zu Oberflächenbeeinflussungen geführt haben. Durch diese Partikel kann es zu deutlich größeren Belastungen und somit auch in höheren Frequenzbereichen zu stärkeren Ausschlägen im Signal kommen. Dies ist bei R-087 auf Grund der körnigeren Struktur wesentlich ausgeprägter.

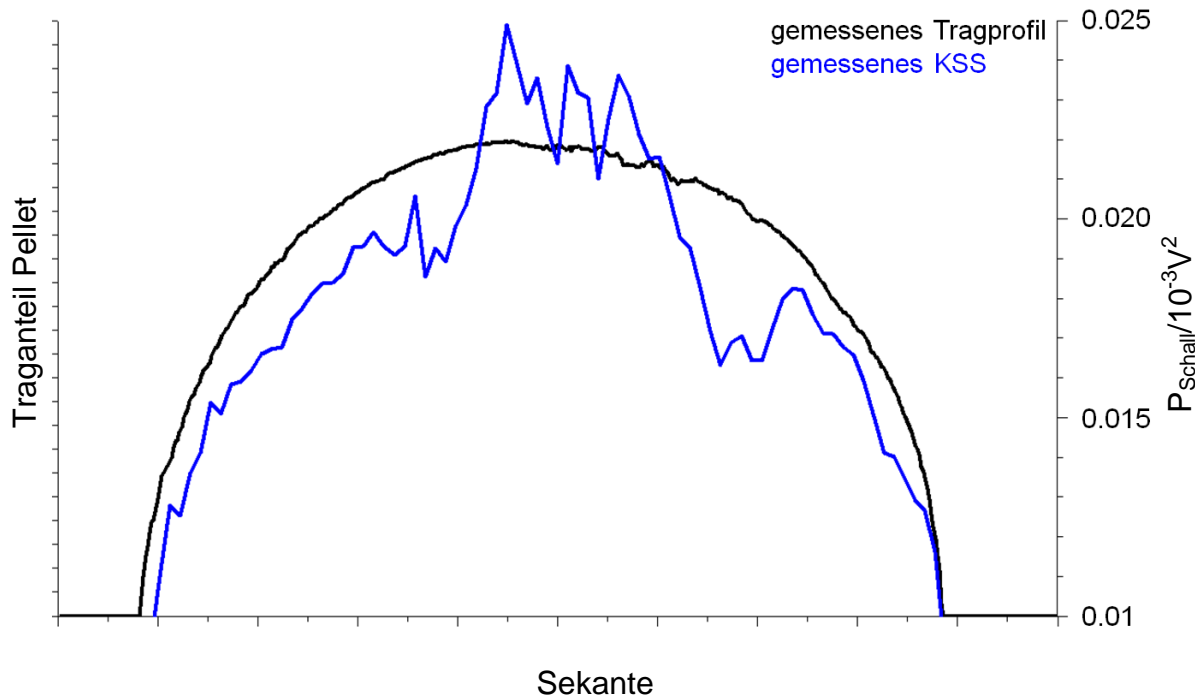


Abbildung 5.22: Kreisquerschnitt: Vergleich Traganteil und gemessenes Körperschallsignal im Bereich von 380-400 kHz bei Composites mit Fasern (B-8402)

5.5.2 Einfluss von geometrischen Formen

Nachdem die zu betrachtenden Frequenzen festgelegt wurden, wird in diesem Kapitel der Einflussfaktor unterschiedlicher geometrischer Formen auf das Schallsignal betrachtet.

Hierzu wurden wieder Kupferpellets verwendet. Die Signalcharakteristik in Abhängigkeit der Geometrie ist materialunabhängig und somit auch auf die anderen Metalle und Verbundwerkstoffe übertragbar und gültig. Kupfer wurde gewählt, da es durch die metallisch glänzende Oberfläche sehr leicht ist, mit bloßem Auge zu kontrollieren, ob die ganze Fläche getragen hat. Im folgenden wurden nun die in Abbildung 5.18 gezeigten unterschiedlichen Geometrien getestet und mit den in Abbildung 5.19 simulierten theoretischen Schalleistungsamplituden und dem gemessenen Tragprofil über dem Querschnitt verglichen.

Kreis

Der Kreis, als einfachste geometrische Form, ist in Abbildung 5.23 zu sehen. Sowohl gemessenes Tragprofil, simuliertes und gemessenes Körperschallsignal liegen hier sehr gut aufeinander. Das gemessene Körperschallsignal des Pellet endet nicht auf der Nulllinie, da sich die Verläufe der einzelnen Pellets überdecken und deshalb das Schallsignal zu einem gewissen Anteil überlappt.

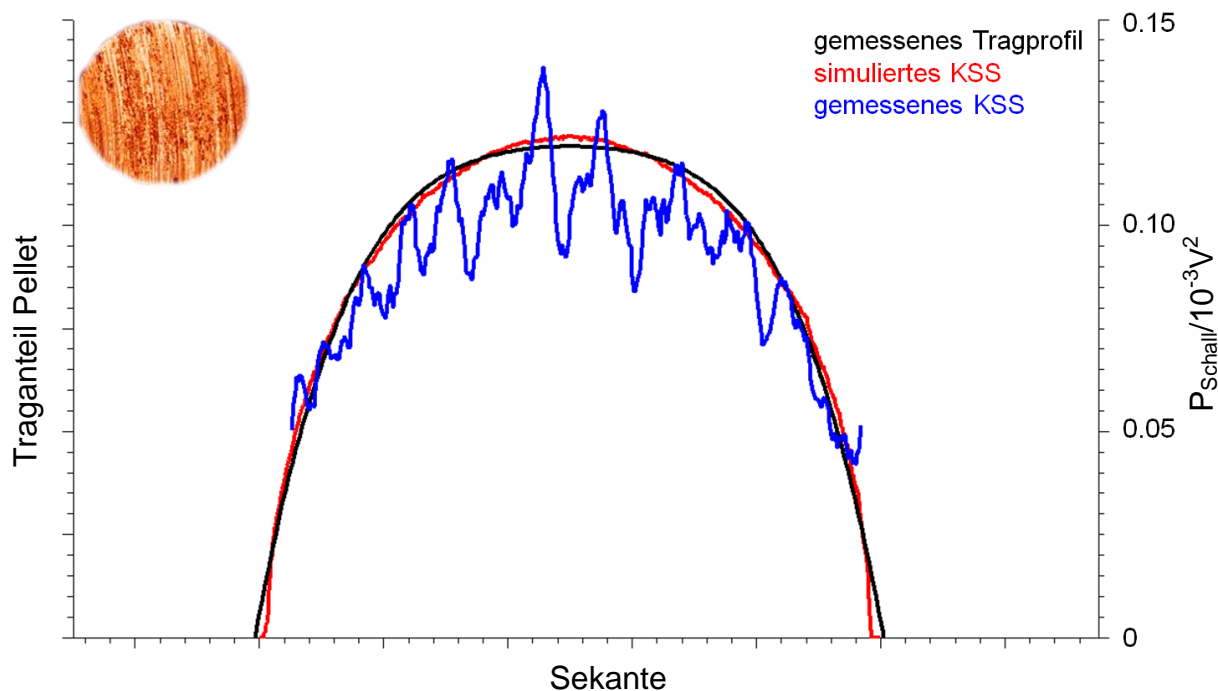


Abbildung 5.23: Vergleich parabolisches Tragprofil, simuliertes und gemessenes Körperschallsignal von einem Kupferpellet

Rechteck

Das Körperschallsignal rechteckiger Pellets ist komplexer. In Abbildung 5.24 ist das gemessene Tragprofil zusammen mit dem simulierten und gemessenen Körperschallsignal aufgetragen. Das Körperschallsignal steigt sehr schnell bis zu dem Punkt, bei dem eine Ecke des Rechtecks in direkter Linie zum Sensor liegt, hier bildet sich ein erstes Maximum aus. Das Signal fällt bis zur Mitte des Rechtecks wieder, da der Traganteil des bewegenden Pellets ebenfalls über den in direkter Linie zum Sensor liegenden Querschnitt sinkt. Das Absinken des Tragprofils ist in diesem Diagramm nicht dargestellt, da es sich hierbei um einen zeitlichen Verlauf handelt, wenn das rechteckige Pellet am Sensor vorbeiläuft. Das in Abbildung 5.24 dargestellte mit dem Weißlichtinterferometer gemessene Tragprofil ist das Tragprofil der schmalen Seite des Rechtecks. Im zeitlichen Verlauf entspricht das vom Körperschallsensor aus gesehene Tragprofil dem simulierten Körperschallsignal. Aufgrund der Symmetrie spiegelt sich ab der Hälfte das Signal seitenverkehrt wieder und somit kommt es hier zu einem zweiten Maximum.

Dieser Verlauf ist sowohl im simulierten, als auch im gemessenen Körperschallsignal zu sehen. Beide Leistungsamplituden haben zur Mitte des gemessenen Tragprofils hin ein lokales Minimum, wohingegen die Flanken sehr stark ansteigen. Auch hier geht das gemessene Körperschallsignal aufgrund der Überlappung nicht ganz bis auf die Achse zurück.

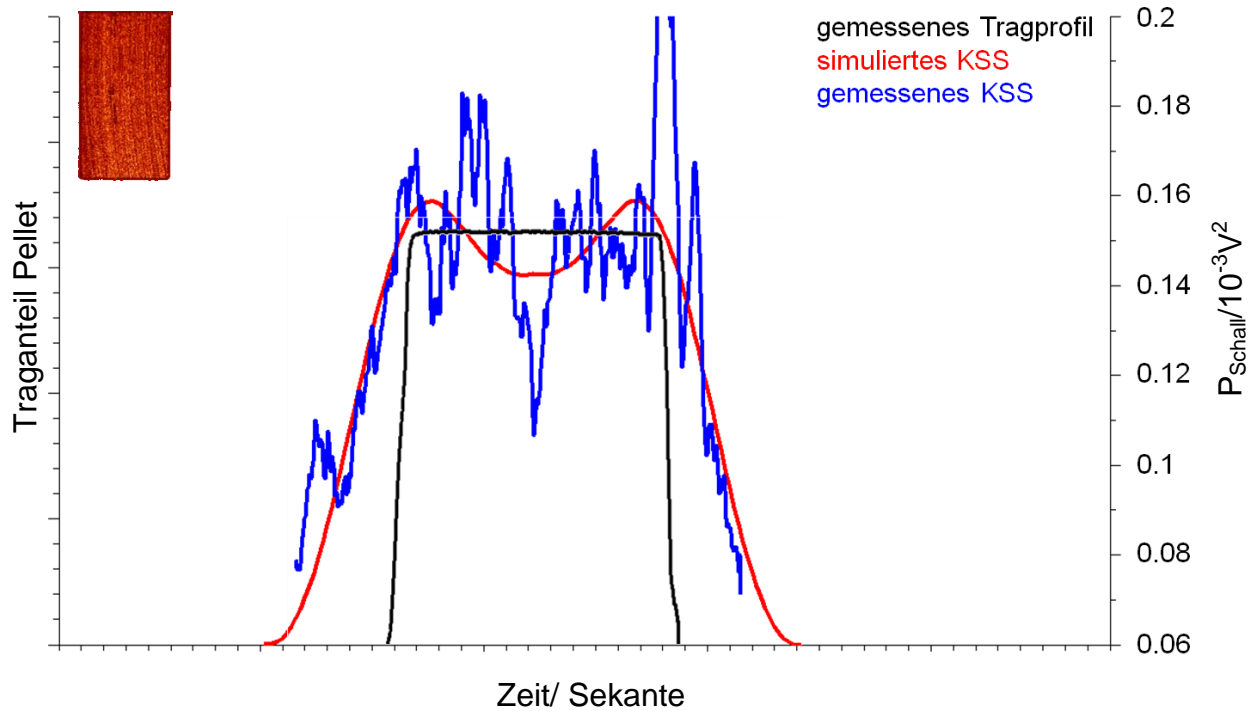


Abbildung 5.24: Vergleich rechteckiges Tragprofil, simuliertes und gemessenes Körperschallsignal von einem Kupferpellet über der Zeit bzw. über der schmalen Seite/Sekante

Die Überlappung ist hier geringer, da die rechteckigen Pellets mit ihrer schmalen Seite (10 mm) zum Sensor zeigen, und somit im Gegensatz zum runden Pellet das Schallsignal schmaler ist.

Kreisbogen

Beim Kreisbogen liegt der Probenkörper auf der Laufbahn und ist genauso wie diese geformt. Da die Kanten radial abgeschrägt sind, kommt es anders wie beim Rechteck zu einem sprunghaften Anstieg der Körperschallkurve. Danach bildet sich ein Plateau aus, da die Breite des Pellets und somit der Traganteil über den gesamten Probenkörper beim Vorbeigleiten am Sensor konstant ist.

Vergleicht man die Flanken in Abbildung 5.25 der simulierten und gemessenen Körperschallkurve, erkennt man sehr gut dass beide Kurven annähernd identisch sind. Auf beiden Seiten fallen die Flanken des Körperschallsignals stark ab.

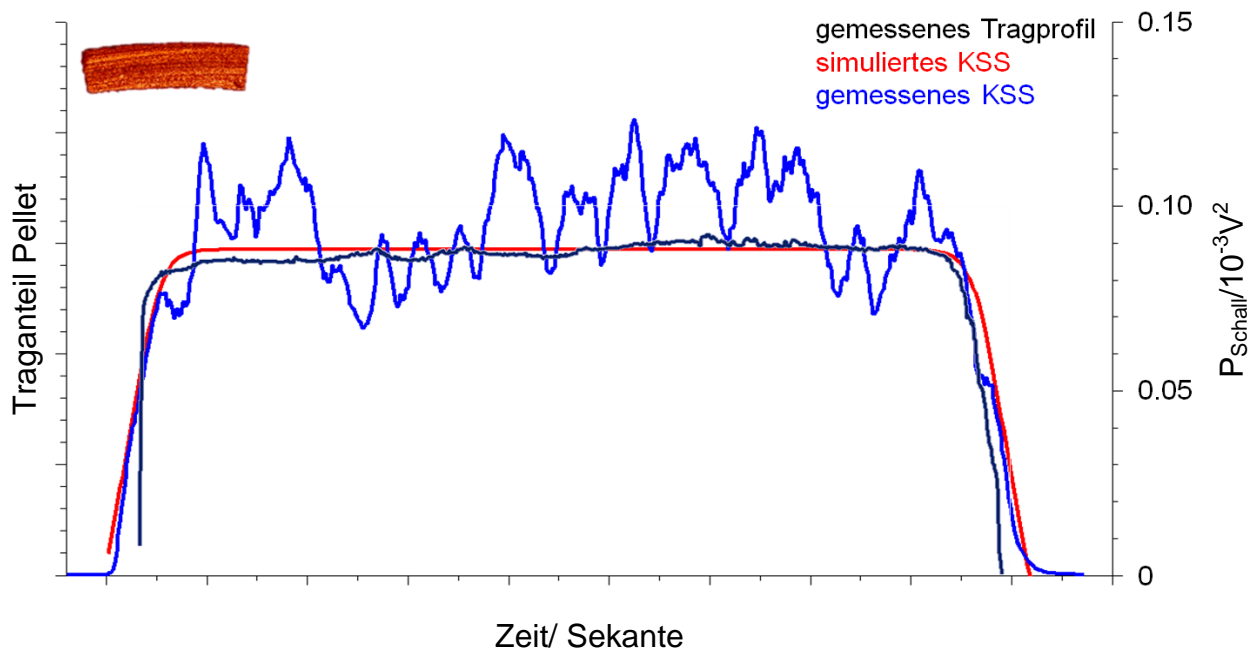


Abbildung 5.25: Vergleich Tragprofil, simuliertes und gemessenes Körperschallsignal

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Körperschallsignal dem Traganteil über der Zeit folgt. Mit Hilfe des Signals lässt sich also auf die geometrische Form schließen.

5.6 Einfluss von Anomalien auf das Schallsignal

Im Kapitel zuvor wurde die Empfindlichkeit des Körperschallsignals gegenüber geometrischen Formen aufgezeigt. Im Folgenden soll diese Empfindlichkeit anhand von geometrischen Anomalien geschärft werden. Es soll festgestellt werden, ob auch kleine geometrische Abweichungen von den vorher analysierten Formen im Schallsignal erkennbar sind.

In Abbildung 5.26 ist links ein Kupferpellet dargestellt, das nur zum Teil abgerieben ist, was man anhand der Laufbahnen auf dem Kupferpellet rechts sehen kann. Der linke Teil des runden Pellets ist unberührt und stand nicht mit der Gegenreibseite in Kontakt. Dadurch lässt sich der Traganteil der Pellets sehr gut bestimmen. Im rechten Teil des Bildes sind der Traganteil des Pellet über der Sekante und das gemessene Schallsignal dargestellt. Man erkennt, dass der Traganteil des Pellets bei 6mm endet. Es ist ebenfalls deutlich zu erkennen, dass das Körperschallsignal ebenfalls bei 6mm stark einbricht und im Verlauf dem Tragprofil folgt. Dies ist genau auch der Punkt, wo links zu sehen ist, dass hier der unberührte Bereich des Pellets beginnt. D.h. das Schallsignal folgt hier exakt dem in Kontakt stehenden Bereich.

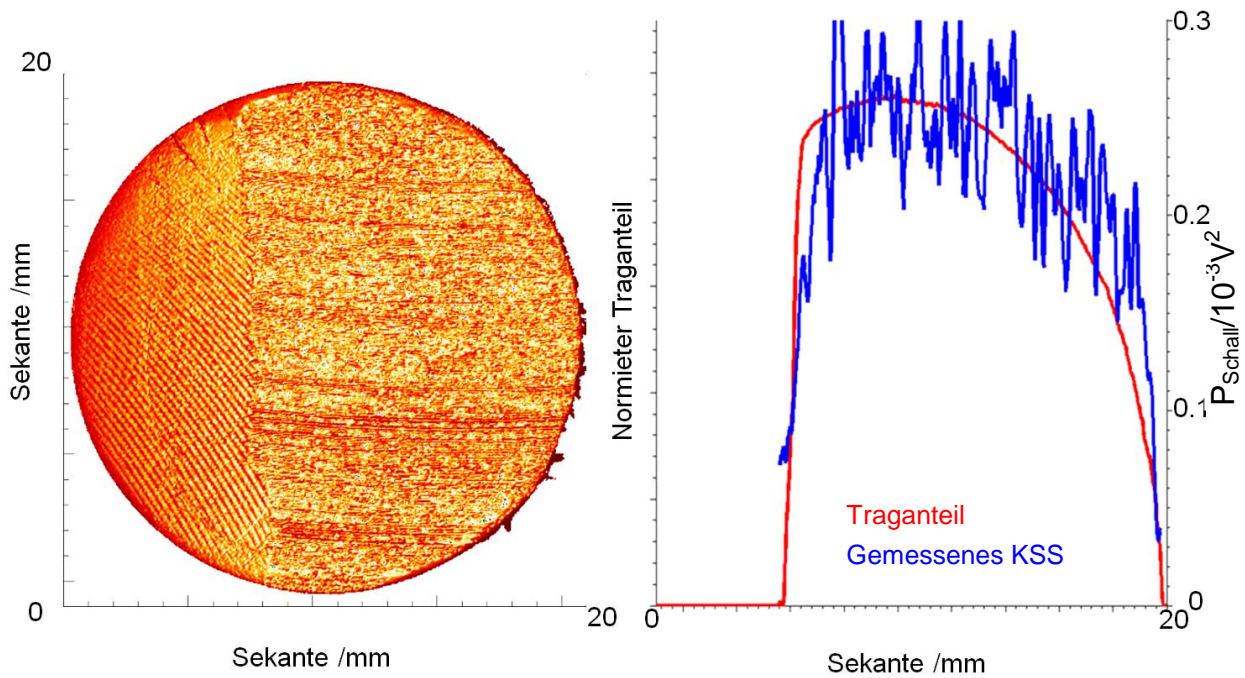


Abbildung 5.26: Pelletgeometrie teilweise verschlissen (links) und Traganteil vs. Körperschallsignal des gleichen Pellets (rechts)

Ein weiteres Beispiel ist in Abbildung 5.27 dargestellt. Hier wurde ein rechteckiges Pellet, mit der schmalen Seite zum Sensor zugewandt, gerieben. Es ist links zu sehen, wie in der oberen Hälfte des Pellets ein Ausbruch zu sehen ist, der keine Laufspuren von der Gegenreibrscheibe aufweist.

Im rechten Diagramm in Abbildung 5.27 ist das Schallsignal des Pellets zu sehen. In rot ist zusätzlich zum Vergleich das simulierte Körperschallsignal dargestellt, wenn das gesamte Pellet tragen würde. Man sieht im Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem theoretischem Signalverlauf einen klaren Unterschied im rechten Teil des Kurvenverlaufs. Es sind im gemessenen Signal deutlich noch einmal zwei kleinere Peaks zu sehen. Diese kommen durch den Ausbruch zustande.

Das Rechteck links ist durch den Ausbruch in zwei Rechtecke geometrisch unterteilt; einem großen Rechteck, mit gleichmäßigem Traganteil über das gesamte Rechteck links und einem kleineren Rechteck rechts, das durch den Ausbruch einen kleineren Traganteil aufweist. Diese Aufteilung ist auch im gemessenen Körperschallsignal durch die Erhebungen im Signal zu eindeutig zu sehen.

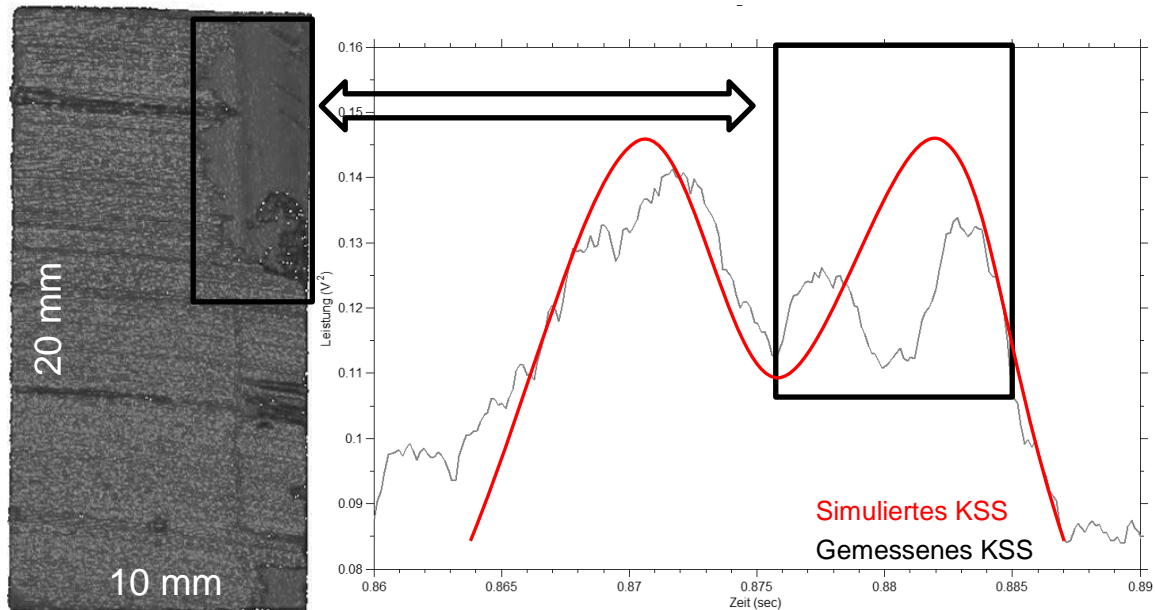


Abbildung 5.27: Rechteckige Probenkörpergeometrie (20x10 mm) mit Ausbruch (links) und entsprechendes Körperschallsignal im Bereich von 180-200 kHz (rechts) im Vergleich mit dem theoretischen Körperschallsignalverlauf eines komplett tragenden rechteckigen Pellet

5.6.1 Kombinierte Körperschallsignalerfassung von Verschleiß und Geometrie

Wie wir in den Kapiteln zuvor gesehen haben, können mit der Körperschallanalyse tribologische Phänomene wie z.B. die Verschleißrate oder auch die Partikelgröße bestimmt werden. Zusätzlich bietet die Schallemissionsanalyse die Möglichkeit, die Geometrie der Pellets zu analysieren sowie reibaktive Gebiete einzugrenzen und zu bestimmen.

Zusätzlich kann durch die Pelletanzahl auf dem Pelletträger auch Prüfstandsparameter, wie die genaue Drehzahl, durch die wiederkehrende Symmetrie im Signal bestimmt werden. Nun soll gezeigt werden, dass die erarbeiteten Methoden kombinierbar sind.

In Abbildung 5.28 ist das Körperschallsignal zweier runder Kupferpellets bei 600 UpM und 5 Nm Drehmoment zu sehen. Durch das periodisch schwankende Signal ist deutlich zu erkennen, dass ein Pellet offensichtlich ein stärkeres Signal erzeugt als das andere.

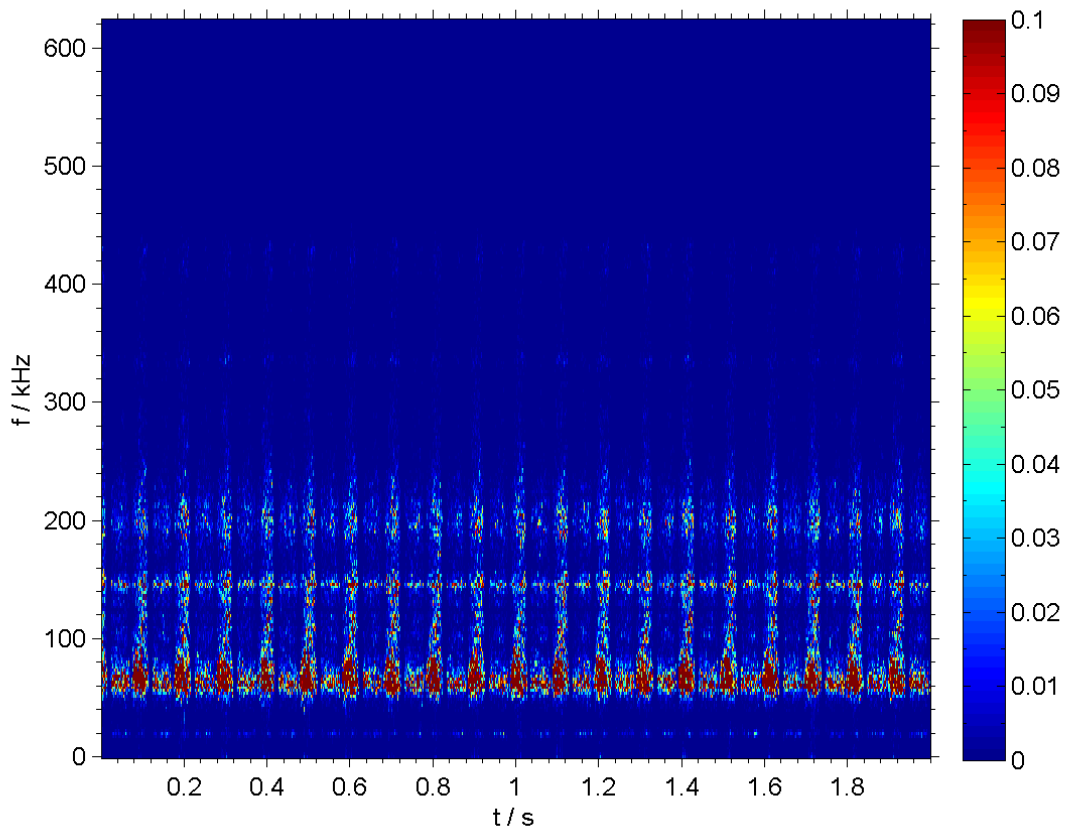


Abbildung 5.28: Ungleichmäßiges Reibsignal des Belages im Spektrogramm von Kupfer

Schaut man sich nun unterschiedliche Frequenzbänder in Abbildung 5.29 an, dann erkennt man die ungleichmäßige Schalleistung zwischen den beiden Pellets. Der Unterschied zeigt sich noch deutlicher im Bereich von 60 kHz bis 70 kHz.

Die ungleichmäßige Belastung der Pellets in diesem Versuch resultierte daher, dass ein Pellet beim Abdrehen von einer Stange Kupfer geringfügig dicker war als das andere und dadurch stärker an die Gegenreibeischiibe gepresst wurde als das andere Pellet.

Dies führte im weiteren Testverlauf zum Verlust des überbelasteten Pellets, indem der Kleber versagte, aufgrund des zu hohen Anpressdruckes und der damit einhergehenden hohen Reibleistung und Temperatur.

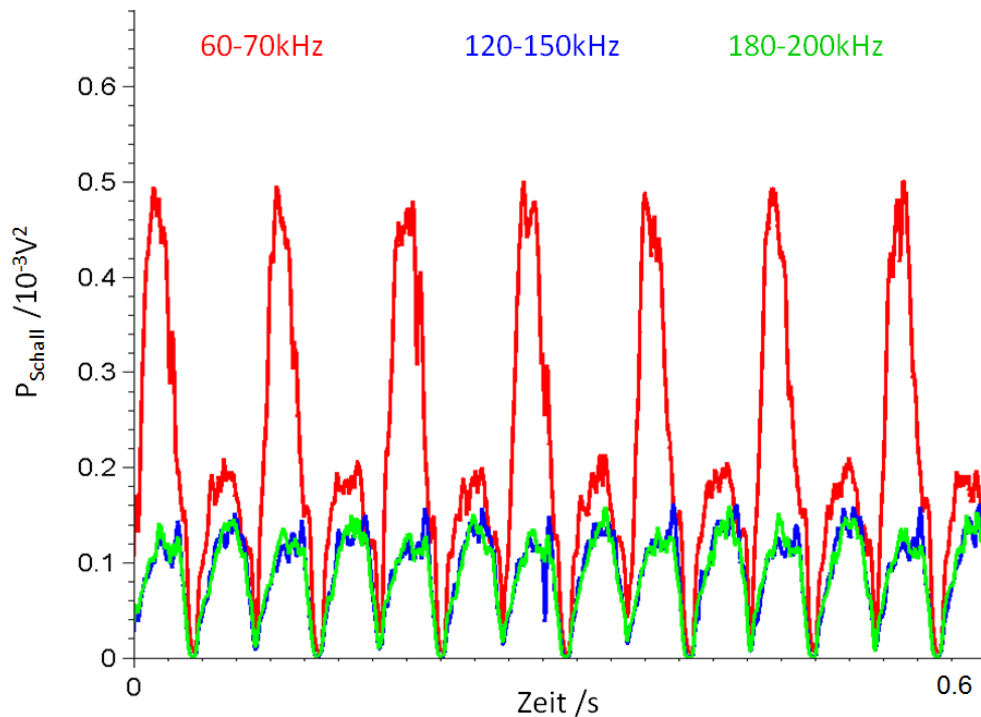


Abbildung 5.29: Verschiedene Frequenzbänder bei ungleichmäßiger Belastung von Kupferpellets

Die höheren Frequenzbänder 120-150 kHz und 180-200 kHz zeigen keine Ungleichverteilung der Last.

Da der Frequenzbereich von 180-200 kHz bei Metallen geeignet ist um Tragprofilverläufe darzustellen, ist es durchaus möglich, so gleichzeitig sowohl Verschleiß und deren Herkunft im selben Signal zu erfassen.

Somit wurde hier gezeigt, dass das Körperschallsignal neben den Einflussfaktoren Belastung und Geschwindigkeit auch geometrische Einflüsse darstellen kann. Zu trennen sind hier einmal die Frequenzbereiche, mit denen sich auch ungleichförmige Belastungen detektieren lassen von den Frequenzbereichen, mit deren Hilfe man die reibaktiven Zonen im Reibkontakt detektieren und auch kleinste Anomalien aufspüren kann.

6 Validierung

Das Problem jeder Onlinemessung ist deren Validierung. Sowohl bei den gerade gezeigten Untersuchungen in dieser Arbeit, als auch in allen Veröffentlichungen, findet eine Überprüfung der Ergebnisse immer offline statt. Das Verschleißvolumen als auch die Oberfläche konnte erst nach jedem Testlauf erfasst und mit den Kenngrößen des Körperschallsignals verglichen werden.

Die gemittelte Schalleistung wurde also mit dem aufsummierten Verschleißvolumen verglichen. Ebenfalls konnte nur das Schallsignal am Ende einer Messung für den Vergleich mit der Oberfläche eines Pellet herangezogen werden, aufgrund der zeitlichen Änderung der Oberfläche.

Um die Schallemissionsanalyse als Onlineanalyse von tribologischen Kontakten zu etablieren, muss diese aber mit einem anderen etablierten Onlineverfahren validiert werden. Hierfür wurden zwei verschiedene Methoden gewählt.

Mit der RNT soll nun eine Validierung mit einem Onlineanalyseverfahren stattfinden. Hiermit soll nachgewiesen werden, dass sich die Verschleißrate tatsächlich durch die Schalleistung und die Anzahl der Peaks beschreiben lässt.

Mit der Thermografiekamera sollen die Erkenntnisse aus der Oberflächenmessung validiert werden. Hiermit soll gezeigt werden, dass sich mit Hilfe der Körperschallanalyse geometrische Abhängigkeiten und der Traganteil detektieren lassen. Hierzu wurde überprüft, ob es in den relevanten Bereichen auf der Probe zu erhöhten Temperaturen kommt.

Die Validierung wurde an Verbundwerkstoffe durchgeführt, damit dies für die Kategorie V in der tribologischen Reihe gilt und die Funktionsfähigkeit für real eingesetzte Werkstoffe nachgewiesen wird.

6.1 Validierung mit Hilfe der Radionuklidtechnik

In einem Langzeittest von zwei Stunden wurde ein Verbundwerkstoff ohne Fasern untersucht. Dabei wurde alle 30 Sekunden für zwei Sekunden das Schallsignal auf der Rückseite der Reibscheibe aufgenommen. Währenddessen wurde der Verschleiß kontinuierlich mit Hilfe der RNT gemessen. Das Verfahren und der Prüfstand wurde bereits in Kapitel 4.3.2 erläutert.

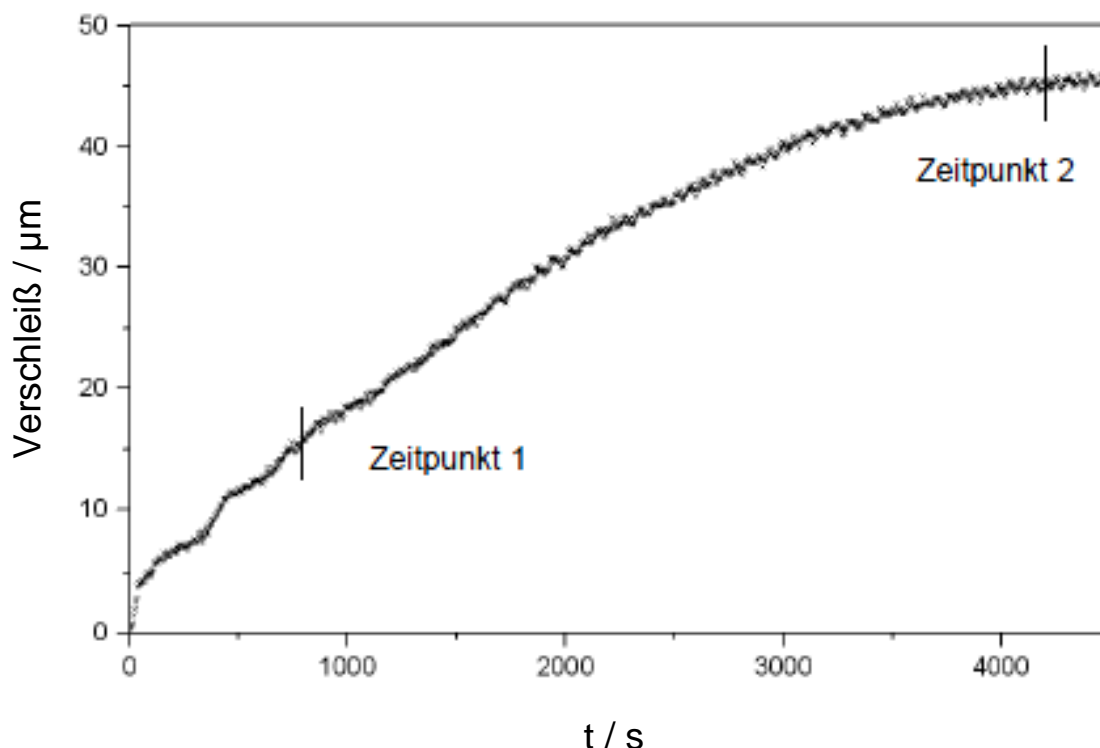


Abbildung 6.1: RNT gemessener kumulierter Verschleiß²⁷⁴ bei konstanten 600 UpM und 5 Nm Drehmoment

In Abbildung 6.1 ist der durch die RNT gemessene Verschleiß zum jeweiligen Zeitpunkt aufgetragen. Es ist zu sehen, dass die Reibbeläge einen Einlaufprozess von ca. 4000 Sekunden durchlaufen. Nach einer anfänglich stark steigenden Verschleißrate geht die Kurve in einen annähernden linearen Bereich über. Nach ca. 3000s flacht die Verschleißrate merklich ab.

Exemplarisch sind in Abbildung 6.2 die zu den zwei in Abbildung 6.1 gezeigten Zeitpunkten gemessenen Körperschallkurven dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Körperschallsignal im entscheidenden Bereich 60-70 kHz mit der Verschleißrate erkennbar sinkt.

²⁷⁴ (FA. IAVF GMBH, 2010)

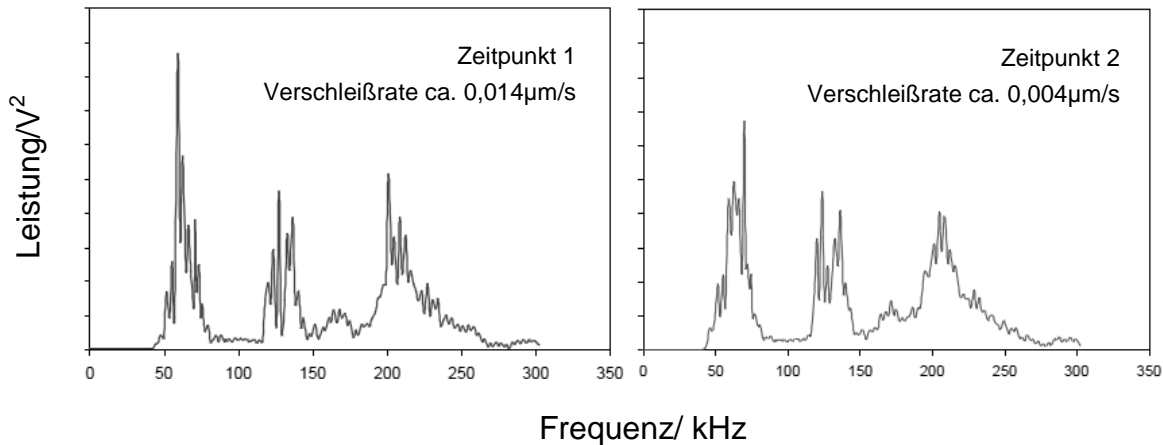


Abbildung 6.2: Schallamplituden an den zwei Zeitpunkten aus Abbildung 6.1.²⁷⁵

In Abbildung 6.3 ist der Verschleiß, die Anzahl der Peaks und die Schalleistung jeweils normiert auf den Anfangswert dargestellt.

Hier sieht man sehr deutlich, dass die Schalleistungskurve der Verschleißkurve folgt. Die Anzahl der Peaks folgen ebenfalls der Verschleißkurve. Alle drei Kurven sind annähernd parallel. Damit ist erstmals die Schalleistung des Körperschalls mit dem durch RNT gemessenen Verschleiß direkt korrelierbar.

Dies bestätigt auch die offline getroffenen Aussagen, dass Peakanzahl und Schalleistung die aktuelle Verschleißrate in einem tribologischen Kontakt wiedergeben und man darüber zu sehr genauen Aussagen kommen kann, wie die Verschleißrate und das Verschleißvolumen zu einem bestimmten Zeitpunkt sind.

²⁷⁵ (FA. IAVF GMBH, 2010)

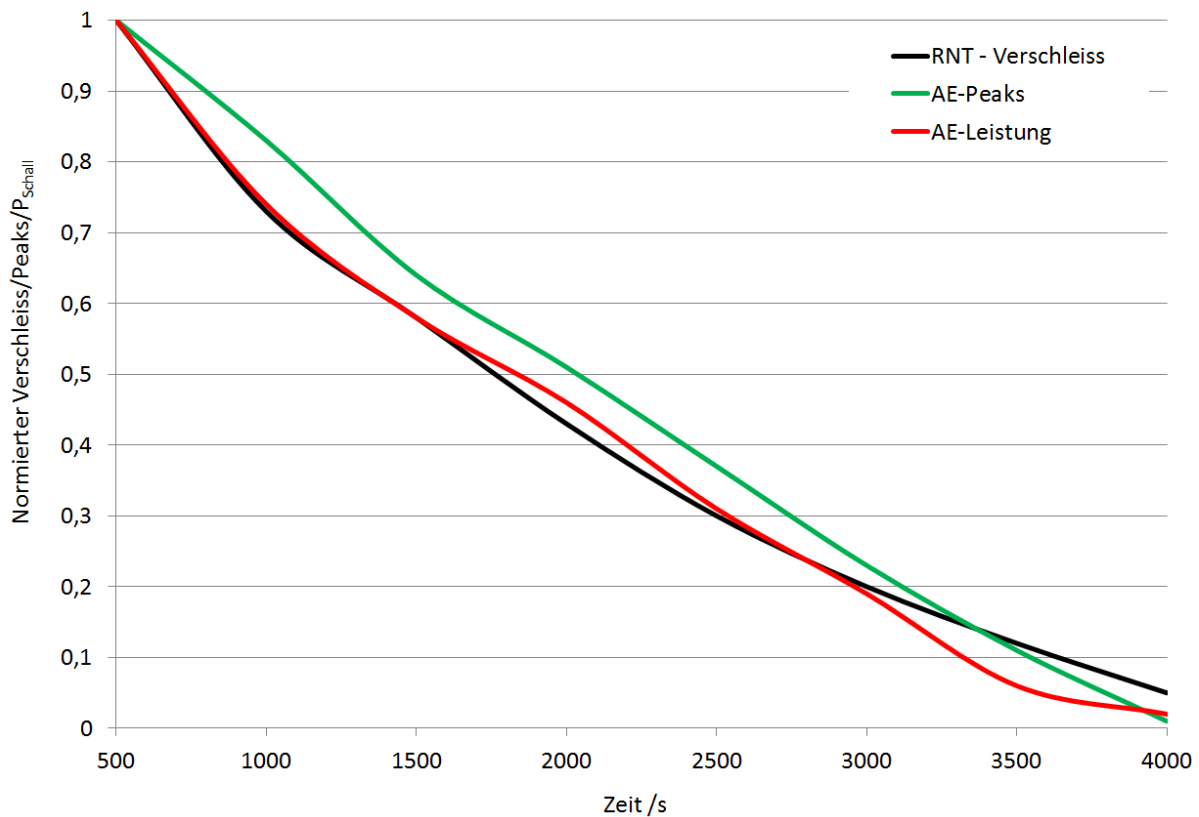


Abbildung 6.3: Änderung von genormter Körperschalleistung, Anzahl der Peaks und Verschleiß über der Zeit beim Versuch aus Abbildung 6.1.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass man durch die Betrachtung der Schalleistung und der Peakanzahl des Körperschallsignals zu einer qualitativ gleichen Aussage kommen kann, wie mit der wesentlich teuren und aufwendigeren RNT.

6.2 Validierung mit Hilfe der Thermografiekamera

Mit der RNT wurde das Körperschallsignal bereits in Bezug auf Verschleiß korreliert und validiert. Da bei der RNT nicht der tatsächliche Reibbereich des Pellets detektiert werden kann, wurde mit einer hochauflösenden Wärmebildkamera ein weiteres Online-Messverfahren gewählt, um die Ergebnisse der Körperschallmesstechnik zu validieren.

Hierzu wurde in die Gegenreibscheibe eine 25mm Blende hineingefräst. Von der Rückseite der Gegenreibscheibe aus wurde die Thermografiekamera auf die Blende gerichtet (siehe Abbildung 6.4) und die Aufnahmen auf die Drehzahl getriggert. Da der Körperschallsensor um 90° versetzt zur Blende an der Gegenreibscheibe angebracht war, legte das aufgenommene Pellet zwischen Erfassung mit der Thermografiekamera und dem Körperschallsensor 125mm zurück. Dabei ändern sich die reibaktiven Bereiche. Die Änderung der Bereiche wurde bei einem Pellet über

mehrere Umdrehungen hinweg analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass die Änderungen in der Temperaturprofilverteilung über dem Pellet zwischen zwei ganzen Umdrehungen kleiner 3% sind und damit ein Vergleich zwischen Körperschall und Thermografieaufnahme bei einer viertel Umdrehung durchaus noch zulässig ist.

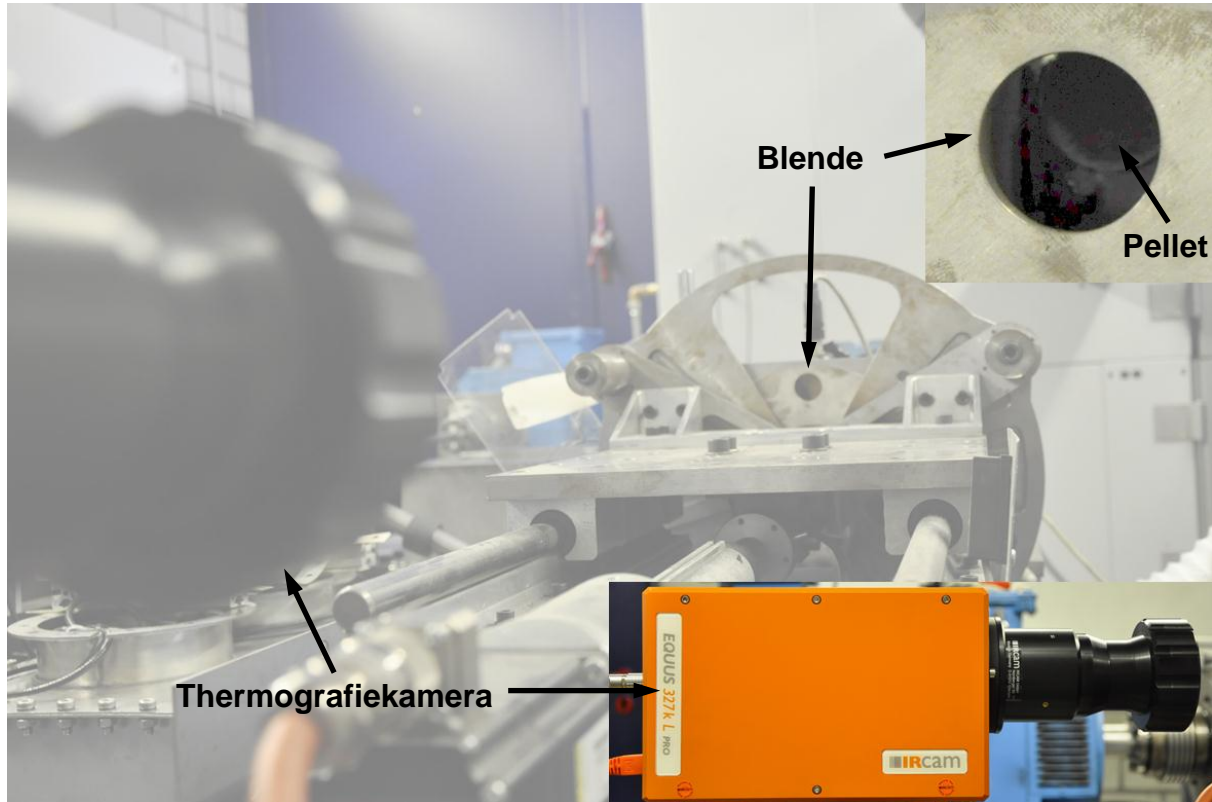


Abbildung 6.4: Versuchsaufbau mit TRM 1.0 und Thermografiekamera

Die Thermografiekamera war mit einem Laptop verbunden, der online die Temperaturbilder der Pellets lieferte. Somit konnten Temperaturfelder über der Pelletoberfläche ermittelt werden, und diese dann mit der Schalleistung ins Verhältnis gesetzt werden.

Der Versuch wurde mit einer Drehzahl von 600 UpM und einem Drehmoment von 5 Nm durchgeführt. Es wurden sechs Pellets eingesetzt, damit sich die Kraft gleichmäßig auf alle Pellets verteilt, auch wenn ein Pellet vor der Blende war und somit für kurze Zeit keine Kraft aufnahm. Als Pelletmaterial wurde der faserlose Belag R-087 gewählt.

In Abbildung 6.5 sind die Ergebnisse einer Thermografiemessung nach 8 Minuten Versuchszeit im Vergleich mit dem Körperschallsignal des entsprechenden Pellets dargestellt. In der Thermografiekameraaufnahme entspricht der gelbliche bis rote Bereich dem Pellet. Die Temperatur des Pellets liegt zwischen 48°C und 75°C. Es ist deutlich ein orange-roter bis stellenweise roter exzentrisch liegender Bereich auf

der Pelletoberfläche erkennbar, in dem die Temperatur mit ca. 61°C bis 75°C besonders hoch ist, gegenüber dem restlich gelblich gefärbten Bereich.

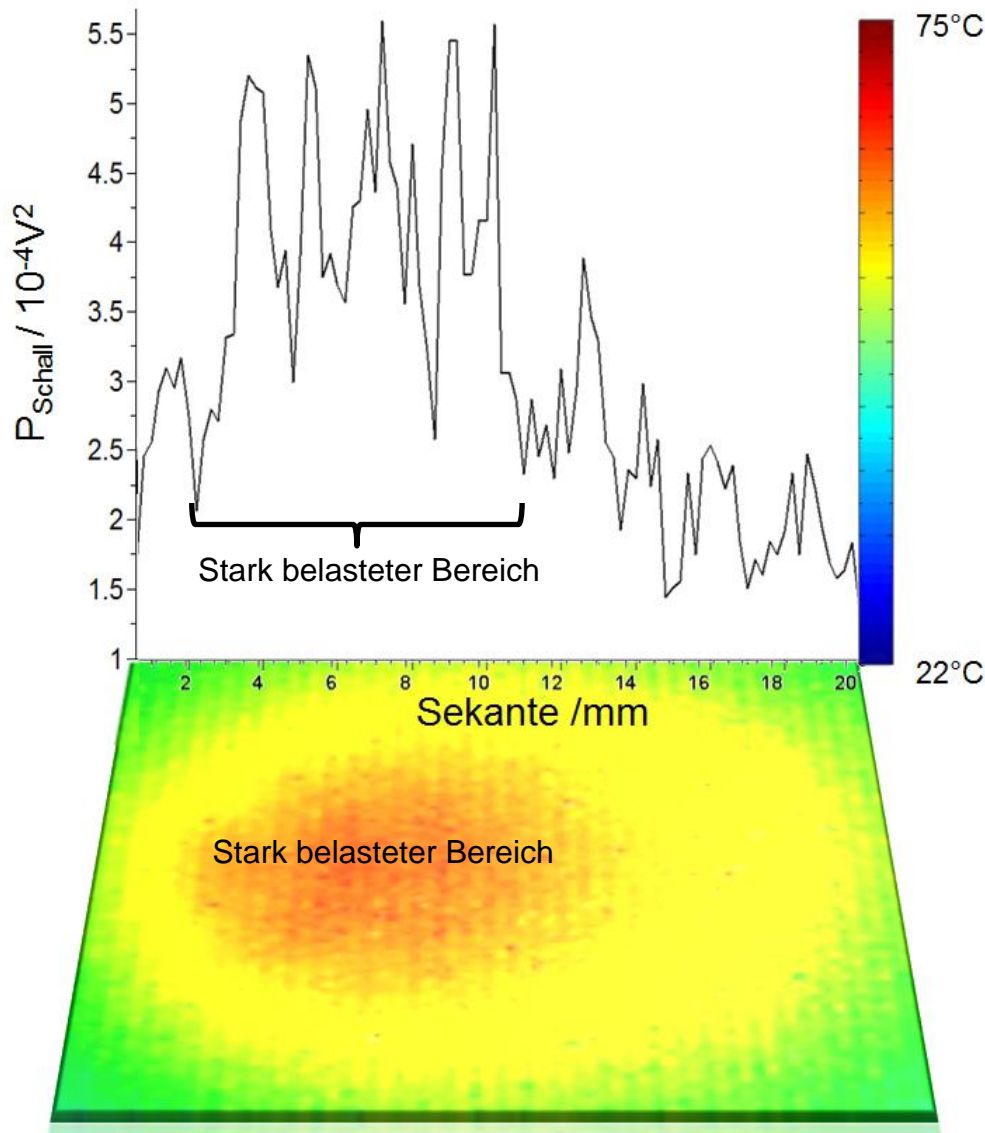


Abbildung 6.5: gelb/roter Bereich entspricht dem Temperaturprofil der Pelletoberfläche und im Vergleich dazu die Körperschalleistung von 180-220 kHz.

Dieser besonders reibaktive Bereich in Abbildung 6.5 findet sich auch im Körperschallsignal wieder. Hier ist ebenfalls zu sehen, dass zwar das ganze Pellet trägt, aber dennoch ein qualitativ stärker belasteter Bereich hier deutlich von der restlichen Schalleistung abhebt.

Die ungleichförmige Belastung führt zu diesem stärkeren Signal und der ungleichmäßigen Temperaturverteilung über dem Pellet. Die Pelletoberfläche ist, genau wie die Gegenreibeischeibe, nicht vollständig eben. Somit kommt es in manchen Bereichen der Pelletoberfläche zu verstärktem Kontakt. Durch die

Elastizität des Pelletmaterials wird aber trotzdem die gesamte Fläche angepresst. Im Bereich des geringeren Drucks ist der Kontakt jedoch schwächer, so dass es zu einer schwächeren Erwärmung und nicht zu so großen Schalleistung kommt, wie im stark belasteten Bereich.

Der Vergleich der beiden Messmethoden zeigt, dass der Körperschall genauso wie die Thermografiekamera online stark reibaktive Bereiche identifizieren und darstellen kann.

Mit dem Körperschall ist es allerdings, im Gegensatz zur Thermografiemessung, nicht möglich den genauen Ort in der Ebene festzulegen. Hier hat die Thermografiemessung Vorteile. Wobei hierbei das beobachtete System zum Zeitpunkt der Messung nicht in Kontakt zur Gegenreibe ist und das Tribosystem verändert wird.

7 Fazit

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Fragestellung nachgegangen, ob sich die bisherigen Erkenntnisse der Schallemissionsanalyse aus Stift-Scheibe-Untersuchungen auf die nächste Stufe der tribologischen Prüfkette übertragen lassen.

Als erstes wurde diese Übertragbarkeit für metallische Reibbeläge analysiert und validiert:

Bei Metallen wurden bei Variation der Belastung und Relativgeschwindigkeit vergleichbare Ergebnisse auf dem Trockenreibmodellprüfstand erzielt, wie aus bisherigen Stift-Scheibe-Untersuchungen bekannt. Unter Belastungsvariation konnte gezeigt werden, dass die Schalleistung und die Peakanzahl über der Zeit mit der Verschleißrate korrelieren. Bei einer Erhöhung der Reibgeschwindigkeit stieg die Schalleistung, die Anzahl der Peaks nahm jedoch ab. Die Ursache dafür liegt in induzierten Brüchen im Metall während des Reibprozesses, die aber nicht zwangsläufig zu Verschleiß führen. Somit kommt es zwar zu einem Anstieg der Schalleistung durch die Brüche, aber anders als bei steigendem Drehmoment zu einer geringeren Verschleißrate. Die Erkenntnisse entsprechen den Ergebnissen aus bisherigen Untersuchungen in der Literatur, allerdings auf einer höheren Ebene der tribologischen Prüfkette.

Es konnte nachgewiesen werden, dass diese Ergebnisse in einem viel kleineren Frequenzband detektierbar sind, als bisher in der Literatur betrachtet wurden. Die Betrachtung eines schmaleren Frequenzbandes schränkt die online zu verarbeitende Datenmenge sehr stark ein.

Zusätzlich konnte hier eine Abhängigkeit der Schallintensität von der molaren Masse festgestellt werden. Diese Abhängigkeit wurde nachgewiesen indem das gesamte tribologische System mit den Erzeugnissen im Reibkontakt, wie Oxide auf Grund der tribochemischen Reaktion und Temperatur, in die Analyse der Werkstoffparameter miteinbezogen wurden. Die These konnte durch Versuche unter Argon, als den Reibkontakt umgebendes Medium, gestützt werden. Durch das Edelgas kam es zu keiner Oxidverbindung im Reibkontakt und gemäß der These sank dadurch die Schalleistung.

Als zweites wurde die Übertragbarkeit für Verbundwerkstoffe analysiert und validiert:

Nun wurde das Reibverhalten von organischen Verbundwerkstoffen mit und ohne Fasern und deren Einfluss auf das Körperschallsignal betrachtet. Auch hier konnten bestimmte Frequenzbänder detektiert werden, in denen sich ein signifikanter Einfluss

von Belastung und Drehzahl auf das Körperschallsignal zu sehen ist. Beschriebene Phänomene aus dem Stand der Forschung, wie die separate Detektion von Matrixbruch und –verschleiß wie auch Faserbruch und –Verschleiß zeigen sich in den gleichen Frequenzbereichen.

Die beschriebene Dämpfung im Schallsignal durch Matrixstörungen wie Fasern sind ebenfalls zu reproduzieren und findet man in den Diagrammen wieder. Ebenfalls ist hier der Einfluss der unterschiedlichen molaren Massen im Schallsignal zu sehen. Mit steigender molarer Masse steigt Schallsignalleistung.

Im Vergleich zu den Metallen verschleifen hier die Reibbeläge nicht so stark, d.h. die Verschleißvolumina sind deutlich geringer. Bei einer Drehzahlvariation kommt es auf Grund der loser Verbindungen zwischen den einzelnen Bestandteilen des Verbundwerkstoffes nicht zu gleichen Ergebnissen wie bei Metallen. Hier folgen die Peakanzahl und die Schalleistung kontinuierlich der Verschleißrate und dem Verschleißvolumen. Ein Grund sind hier die kleineren Kräfte gegenüber den metallischen Bindungen, die den Verbundwerkstoff zusammenhalten.

Ein weiterer bisher nicht berücksichtigter Aspekt, der für die Entwicklung als auch Überwachung von Friktionswerkstoffen interessant ist, ist die Identifikation der tatsächlich wirksamen Kontaktfläche im Körperschallsignal.

Die Untersuchungen an verschiedenen Belagsgeometrien, wie Kreis, Kreissegment und Rechteck, haben gezeigt, dass anhand der Charakteristik des Körperschallsignals ab Frequenzbändern von 180 kHz sich Funktionskontakte erkennen lassen. Durch Vergleich mit einem simulierten Körperschallsignal konnte man abweichende Tragbilder festgestellt und der Verschleißort genauer eingegrenzt werden.

Die bisher gewonnen Erkenntnisse wurden nun durch bekannte Werkzeuge der Onlineerfassung von Verschleiß und Oberflächentemperaturen validiert. Das modifizierte RNT Verfahren zeigte in einer kontinuierlichen Messung, dass der Verschleiß tatsächlich mit Schalleistung und Peakanzahl korrelieren und bestätigen so online die zuvor offline gewonnenen Erkenntnisse.

Der Abgleich der Schallamplituden mit thermografischen Aufnahmen des Friktionskontaktes zeigt, dass die offline beobachteten und zusammengeführten Erkenntnisse über die Geometrieabhängigkeit des Schallsignals online nachweisbar sind. Auch hier ergibt sich eine hervorragende Korrelation zwischen beiden Arten von Messverfahren.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Körperschallanalyse ein sehr gut geeignetes Messverfahren zur Untersuchung und Überwachung von tribologischen Kontakten darstellt und sich in der Genauigkeit mit bisher etablierten Verfahren messen kann. Durch die Analyse von verschiedenen Frequenzen im

Ultraschallbereich kann man zwei sehr aufwändige und sehr teure Onlinemessverfahren in einem relativ günstigen Messverfahren zusammenfassen.

Im Folgenden werden nun noch einmal die wesentlichen Aspekte der Untersuchungsmethode am TRM mit der Körperschallanalyse dargestellt.

Um zuverlässige und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, ist es wichtig den Körperschallsensor so nah wie möglich an Reibkontakt und so weit wie möglich von anderen Störquellen, wie Lagern oder Motoren, anzubringen. Damit der Körperschall ideal übertragen wird, sollte der Sensor auf der reibaktiven Seite auf einer ebenen, möglichst geschliffenen Oberfläche, aufgebracht werden²⁷⁶. Für die Signalerfassung und Auswertung müssen zunächst, mithilfe von Voruntersuchungen die jeweiligen Frequenzbänder identifiziert werden, die am stärksten auf unterschiedliche Belastungskollektive und Verschleiß reagieren²⁷⁷. Wie die Untersuchungen in dieser Arbeit gezeigt haben, ist das Frequenzband abhängig von den im Reibkontakt wirkflächenpaarbildenden Werkstoffen²⁷⁸.

Bei der anschließenden Auswertung können die einzelnen Frequenzen zu Frequenzbändern von jeweils 10 kHz zusammengefasst werden. Die auszuwertende Datenmenge reduziert sich dadurch bei gleichbleibender Ergebnisqualität.²⁷⁹ Die Steuerung der Messungen, die Signalaufnahme, -speicherung und -verarbeitung erfolgt durchgängig in einem mit Matlab am IPEK entwickelten Programm. Durch ein Triggersignal kann die Untersuchung punktgenau mit dem Start des Prüfstands erfolgen. Die Anzahl der Messungen, sowie die Messdauer können je nach Fahrmanöver individuell gewählt werden und sind nur durch die Leistung des Messrechners limitiert²⁸⁰.

Durch die durchgängige Erfassung und Auswertung der Messdaten mit einer Software ist es hiermit möglich erste Untersuchungsergebnisse bereits online während der Messung zu erhalten. Die Körperschallanalyse ermöglicht daher eine Online-Untersuchung, vergleichbar mit etablierten Methoden, allerdings ohne den Aufwand einer RNT-Untersuchung und ohne Beeinflussung des tribologischen Kontakts, wie bei der Thermografieuntersuchung.

²⁷⁶ Nähere Erläuterung siehe Kapitel 5.1

²⁷⁷ Nähere Erläuterung siehe Kapitel 5.2.1

²⁷⁸ Nähere Erläuterung siehe Kapitel 5.2

²⁷⁹ Nähere Erläuterung siehe Kapitel 5.1

²⁸⁰ Nähere Erläuterung zu Messdauer, Anzahl Messungen und statistischer Absicherung siehe Kapitel 4.4.

Durch die Möglichkeit sowohl die reibaktiven Wirkflächenpaare sowie die Verschleißrate zu identifizieren, hat diese Untersuchungsmethode das Potential zwei sehr aufwendige Validierungsverfahren zu kombinieren²⁸¹.

Mit dieser Untersuchungsmethode können in Abhängigkeit des Versuchslaufs und der auftretenden tribologischen Effekte zusammengefasst folgende Kenngrößen in Prüfkategorie V für Metalle und organische Reibbeläge ermittelt und validiert werden:

- Qualitative Partikelanzahländerung
- Qualitative Partikelgrößenänderung
- Qualitative Verschleißvolumenänderung
- Traganteil über dem Probenkörperquerschnitt
- Oxidanteil zwischen dem WFP
- Änderungen im Belastungskollektiv
- Faser- und Matrixverschleiß
- Belastungsungleichverteilung

Die Ermittlung der genannten Kenngrößen mittels Matlab kann sowohl online, als auch offline erfolgen und läuft automatisiert ab.

Durch die vorangegangenen Untersuchungen zeigt sich, dass mit Hilfe der vorgestellten Messmethode die Körperschallanalyse ein Werkzeug für die Validierung von tribologischen Kontakten sein kann.

²⁸¹ Nähere Erläuterung siehe Kapitel 6

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel soll die Bedeutung der Ergebnisse der Forschungsfragen für die Forschungshypothese dargestellt, und daraus ein Ausblick auf weitere Arbeiten gewonnen werden.

8.1 Zusammenfassung

Mit dem Fokus auf Fahrzeuggesamt- oder Teilsystemen ist die Validierung aufwendig und muss möglichst früh im Entwicklungsprozess von z.B. Reibbelägen berücksichtigt werden, um Zeit und Kosten zu sparen. Für eine genaue Analyse der Vorgänge im Wirkflächenpaar zwischen den Reibpartnern ist ein Onlinemessverfahren notwendig. Die bisherigen Onlineuntersuchungsmethoden, die die RNT und die Thermografie als Messverfahren nutzen sind nur bedingt einsetzbar, aufwendig und beleuchten jeweils entweder den Verschleiß oder die reibaktiven Bereiche. Eine kostengünstige und gleichzeitige Betrachtung dieser zwei tribologischen Größen ohne Beeinflussung des Wirkflächenpaares wäre wünschenswert. Diese alternative Validierungsmethode zeigt die in dieser Arbeit vorgestellte Messmethode, die die Körperschallanalyse als Messverfahren nutzt.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Eignung der Frequenzanalyse von Körperschall-emissionen im Ultraschallbereich zur Erkennung unterschiedlicher tribologischer Phänomene sowie zur allgemeinen Charakterisierung von trockenlaufenden Reibungsprozessen untersucht. Hierbei wurde vor allem die Übertragbarkeit innerhalb der tribologischen Messkette genauer analysiert und erstmals für eine reale Anwendung, hier Friktionswerkstoffe in Kraftfahrzeugkupplungen oder Bremsen, getestet. Zunächst wurden Ergebnisse aus dem Stand der Forschung bei einem sehr komplexen Prüfaufbau mit wesentlich mehr Störquellen für das Signal reproduziert. Anschließend wurde die Übertragbarkeit von bisher primär getesteten Metallen auf Verbundwerkstoffe mit und ohne Faser untersucht. Die gemachten Erkenntnisse wurden anhand der Radionuklidtechnik und der Thermografieanalyse erstmals mit zwei Onlinemesssystemen validiert.

- Bei der Überwachung des Reibkontaktes durch die Ultraschallemissionsanalyse ist ein Erkennen der Verschleißrate zuverlässig möglich. Auch unterschiedliche Reibungszustände und Belastungskollektive sind in den Emissionen erkennbar. Eine Abhängigkeit der Schallintensität von der molaren Masse wurde aufgezeigt.

- Die der Schallemissionsanalyse in diesem Kontext durch andere Autoren bereits mehrfach attestierte Fähigkeit der Verschleißbestimmung konnte erstmals am System Trockenreibmodellprüfstand durch Parallelmessungen mit Hilfe der Radionuklidtechnik in Echtzeit nachgewiesen werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Emissionen maßgeblich durch Verschleißprozesse mitbestimmt sind. Die Eigenschaft des Körperschallsignals zu einer Aussage bezüglich eines aktiven Reibbereiches konnte ebenfalls aufgezeigt und mit Hilfe der Thermografiemessungen validiert werden.

Somit wurden alle Forschungsfragen aus Kapitel 3 der Arbeit erfolgreich beantwortet und die Forschungshypothese für trockenlaufende Friktionssysteme belegt. Die Körperschallanalyse hat damit das Potential bei der Validierung trockenlaufender Friktionssysteme als Messmethode sich gegenüber anderen herkömmlichen Messmethoden zu behaupten.

Generell ist anzumerken, dass die Absolutwerte der gewonnenen Ergebnisse in Form von Signalleistungen nicht unmittelbar auf Anwendung unter anderen Randbedingungen übertragbar sind. Sie hängen von der verwendeten Messkette und den Eigenschaften des betrachteten Systems ab. Allgemeingültige Aussagen für bestimmte Kennwerte können darum nicht gegeben werden. Für zuverlässige Aussagen ist stets eine Trendbetrachtung vorzunehmen.

8.2 Ausblick

Die aufgezeigten Möglichkeiten der Schallanalytik bieten vielerlei Nutzen und Möglichkeiten, bei Nutzung der Triangulation durch mehrere Sensoren ein klareres Bild von Tribosystemen zu erhalten. So kann durch Kopplung der Sensorsignale sogar über das kontinuierliche Signal erfasst werden, wie die reale Oberfläche, die gerade in mechanischem Kontakt steht, zu jedem Zeitpunkt aussieht.

Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die nächste Stufe der tribologischen Reihe wurde ansatzweise mit dem Pelletträger aus Abbildung 8.2 rechts und mit sechs Pellets des Typs B-8402 am Trockenreibprüfstand (TRP) des IPEK durchgeführt. Dabei wurde bei konstanter Drehzahl von 600 UpM das Drehmoment von 5 Nm auf 10 Nm erhöht. Der Sensor wurde auf der Rückseite der fest stehenden Gegenreibeischiibe befestigt und das Schallsignal aufgenommen.

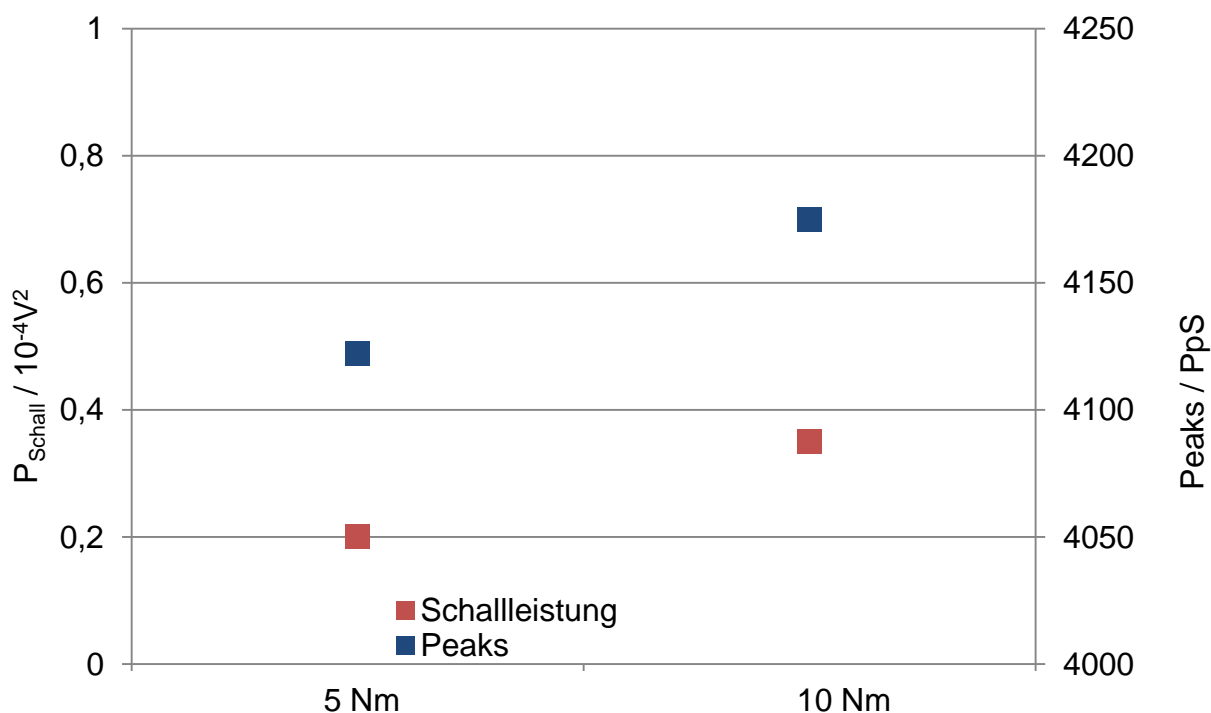


Abbildung 8.1: Schalleistung und die Anzahl der Peaks bei unterschiedlichem Drehmoment, aufgenommen auf der Rückseite der Gegenreibeischiibe am TRP im Frequenzbereich von 60-70 kHz.

In Abbildung 8.1 sieht man, dass mit steigendem Drehmoment, wie auch am TRM, Schalleistung und Peakanzahl steigt. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl die auf Last empfindlich reagierenden Frequenzbänder hier dieselben sind, als auch die Geometrie der Pellets sich wieder deutlich im Signal abbildet.

Die gewonnen Erkenntnisse wurden alle unter Dauerschlupfbedingungen gewonnen. Sicherlich wäre hier ein nächster Schritt, diese Erkenntnisse bei geschalteten

Kupplungsversuchen zu fahren und so die Aussagefähigkeit der Analysemethode weiter zu validieren und verifizieren.

Die Körperschallemissionsanalyse kann ebenfalls als Entwicklungstool bei der Validierung für trockenlaufende Friktionssysteme genutzt werden, beispielsweise als Entwicklungs- und Überwachungstool bei der Entwicklung von trockenlaufenden Reibbelägen oder als unterstützendes Werkzeug für die Entwicklung von Keramikcupplungen²⁸² am IPEK.

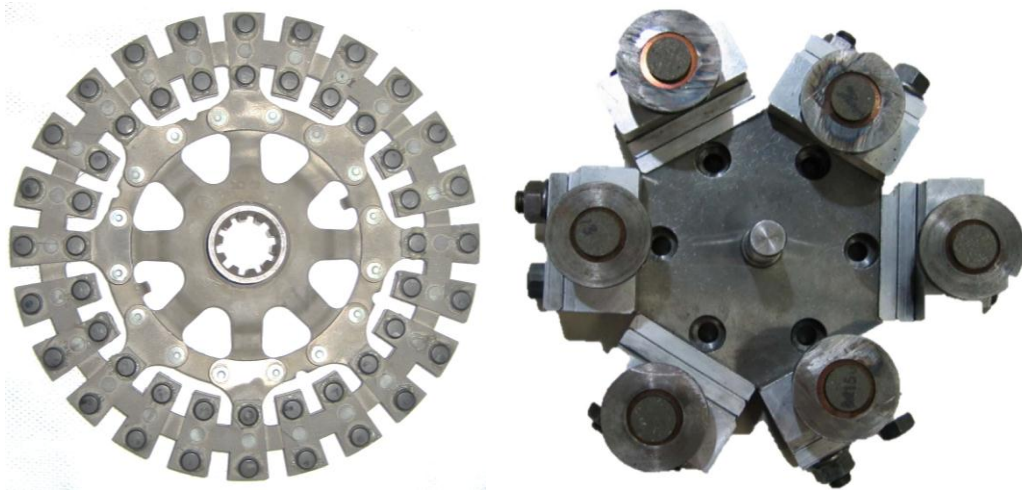


Abbildung 8.2: Keramikcupplung, entwickelt im Rahmen des SFB 483 am IPEK²⁸³ (links) und ein Pelletträger der für Versuche innerhalb der tribologischen Reihe benutzt wird, zum Testen der Funktionen der Pellets (rechts).

Erste Versuche zeigen dieses Potential auf. Es wurde ein Pelletträger mit sechs Keramikpellets im Dauerschlupfbetrieb gefahren. Anhand des Körperschallsignals lässt sich auf Anhieb erkennen, dass hier nicht alle Pellets gleichmäßig tragen (siehe Abbildung 8.3). Man kann deutlich zwei Schalleistungen sehen, die eine größere Schallamplitude haben, als die anderen.

²⁸² (ALBERS u. a., 2011a)

²⁸³ (MITARIU-FALLER, 2009)

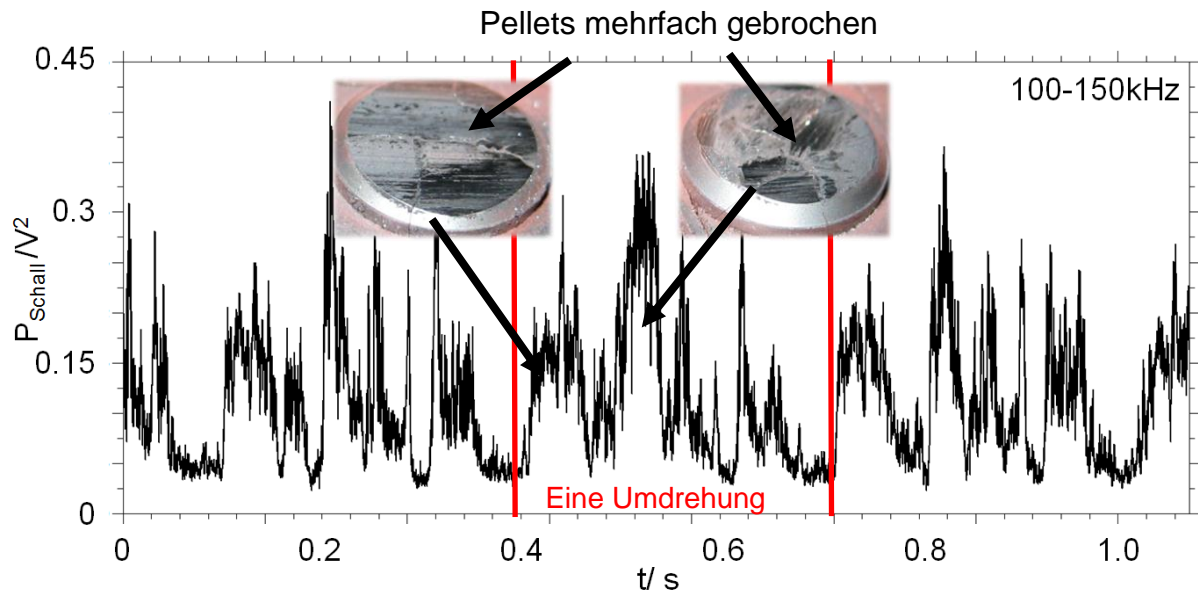


Abbildung 8.3: Körperschallsignal von sechs nicht gleichmäßig laufenden Keramikpellets bei 200 UpM und 30 Nm Drehmoment und das Endergebnis von zwei Pellets, die am Ende nach zwei Stunden Versuchszeit mehrfach gebrochen sind

Diesen zwei Körperschallverläufen sind die zwei Pellets zugeordnet, bei denen man sieht, dass diese auch mehrfach gebrochen sind. Dies entstand auf Grund der Überbelastung während dem Versuch und diese größere Belastung ist auch so im Schallsignalverlauf eindeutig wiederzufinden.

Bisher bestand bei den Versuchen das Problem, dass die Brüche aufgrund ungleichmäßiger Belastung bei der Betrachtung der Pellets erst nach dem Versuch festgestellt werden können. Mit Hilfe des Körperschallsignals ließe sich online ungleichmäßige Belastung schon vor der Schädigung sehen und frühzeitig eingreifen. Ebenfalls ist es möglich bei einem mit Körperschall überwachten Reibbelag aus der Schalleistung und der Anzahl der Peaks den Verschleiß, unterschiedliche Partikelgrößen und die qualitative Verschleißrate zu erfassen. Durch die gleichzeitige Analyse eines zweiten Frequenzbandes im Ultraschallbereich kann zusätzlich der tatsächliche Traganteil ermittelt werden, woraus in Kombination mit einer permanenten Überwachung Verschleißhistorien erzeugt werden können. Dies kann eine Erfassung mit RNT und/oder einer Thermografiekamera ersetzen. Zumal eine gleichzeitige Erfassung mit beiden Messverfahren konstruktiv sehr aufwändig und messtechnisch sehr teuer sein würde.

Die Körperschallerfassung und –analyse im Ultraschallbereich kann als einfach zu handhabende Messmethode zu einem besseren Verständnis der tribologischen Prozesse beitragen.

In Verbindung mit einer Kapselung des reibaktiven Bereiches und einer kapazitiven Erfassung des Verschleißes am Ende der Messkette, anstatt der RNT, ist ebenfalls

ein quantitativ messendes System zur weiteren Validierung der Körperschallanalytik möglich.

Der volle Umfang der Analysemöglichkeiten geht über das bisher genutzte Niveau der reinen Amplitudenbetrachtung über alle Frequenzen hinweg hinaus. Die Körperschallanalyse könnte als Werkzeug sowohl bei der reinen Belagsentwicklung für Bremsen und Kupplungen eine wichtige Unterstützung bei der Validierung sein, als auch bei der Schadensanalyse durch das Erkennen von Belastungs-Hotspots.

9 Literaturverzeichnis

ALBERS, 2011a

ALBERS, A. ; OTT, S. ; BABIK, A. ; BERNHARDT, J. ; ABSCHLUSSKOLLOQUIUM DES SFB 483 AM 25. OKTOBER 2011 IN KARLSRUHE: Kupplungssystementwicklung für Fahrzeuge unter der Anwendung ingenieurkeramischer Friktionssysteme zur Steigerung der systemischen Leistungsdichte. In: , 2011a

ALBERS, 2011b

ALBERS, A. ; OTT, S. ; SPÄTH, C.: Kupplungsmodell zur Beschreibung des Kupplungssystemverhaltens. In: *VDI Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2011*, 2011b

ALBERS, 2011c

ALBERS, A. ; OTT, S. ; SPÄTH, C.: Kupplungsmodell zur Beschreibung des Kupplungssystemverhaltens. In: *VDI Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2011*, 2011c

ALBERS, 2010

ALBERS, A.: The Integrated Product Engineering Model (iPeM) and its Central Hypotheses In: TMCE, 2010

ALBERS 2010b

ALBERS, A.; MUSCHIK, S.; IPEK - INSTITUT FÜR PRODUKTENTWICKLUNG AM KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT): The Role and Application of Activities in the Integrated Product Engineering Model (iPeM) (2010b)

ALBERS, 2010a

ALBERS, A.; DÜSER, T.; IPEK - INSTITUT FÜR PRODUKTENTWICKLUNG AM KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT); ASME ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS & EXPOSITION VANCOUVER 12. 11.-18.11.2010: A new process for configuration and application of complex validation environments using the example of vehicle-in-the-loop at the roller test bench (2010a)

ALBERS; 2010c

ALBERS, A.; OTT, S.; BEHRENDT, M.; MERKEL, P.; GEIER, M.: Validation as knowledgebase for future mobility systems. In: 9. Internationales CTI Symposium, 2010c

ALBERS, 2010d

ALBERS, A.; OTT, S.; FREY, D.; SPAETH,C.: FVA Forschungsvorhaben 442 II: Analyse des Einflusses werkstofftechnischer Parameter auf das Reibschwingverhalten von organischen Friktionswerkstoffen, 2010

ALBERS, 2010e

ALBERS, ALBERT; IPEK - INSTITUT FÜR PRODUKTENTWICKLUNG AM KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT); TMCE'10 ANCONA: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences (2010e)

ALBERS, 2009

ALBERS, ALBERT: Kenngrößen und Belastungsgrenzen von naslaufenden Lamellenkupplungen unter Dauerschlupfbeanspruchung. Frankfurt/Main : FVA, 2009

ALBERS, 2009a

ALBERS, A. ; BERNHARDT, J. ; OTT, S. ; GFT - GESELLSCHAFT FÜR TRIBOLOGIE: TAGUNGSBAND TRIBOLOGIE-FACHTAGUNG 2009: Experimentelle und simulationsgestützte Untersuchung naslaufender Friktionssysteme am Beispiel einer Lamellenkupplung mit ingenieurkeramischen Komponenten (2009a)

ALBERS, 2009b

ALBERS, A.; KELEMEN, S.G.; DAAAM 2009: DEVELOPMENT OF A HOUSING FOR ON-LINE-WEAR-ANALYSIS OF CLUTCH LINING PADS UNDER DRY FRICTION ON TEST BENCHES (2009)

ALBERS, 2009c

ALBERS, A. ; OTT, S. ; BEHRENDT, M. ; BABIK, A. ; SPÄTH, C. ; VDI - GETRIEBE IN FAHRZEUGEN 2009: Einfluss von Werkstoffparametern und Wärmehaushalt auf das tribologische Verhalten trockenlaufender Kupplungen (2009c)

ALBERS; 2008

ALBERS, A.; ALINK, T.; MATTHIESEN, S.; THAU, S.: Support of system analyses and improvement in industrial design through the Contact & Channel Model (2008)

ALBERS, 2007

ALBERS, ALBERT; MEBOLDT, MIRKO: Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In: : The Design Society, 2007, S. 611-612 (exec. summ.)

ALBERS, 2007a

Albers, A. ; Behrendt, M. ; Ott, S. ; VDI-Berichte Nr. 1987, Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben, Wiesloch bei Heidelberg, 25.04.2007: Entwicklungsmethodik für Kupplungssysteme – Modellbildung, Versuch und Simulation (2007a)

ALBERS, 2007b

ALBERS, A. ; OTT, S. ; KARRAR, C. ; VDI-TAGUNG, NICHT LINEARE SCHWINGUNGEN, KASSEL, 2007: Übertragbarkeit des Systemverhaltens zwischen Prüfkategorie und Probekörpergeometrien (2007b)

ALBERS, 2005

ALBERS, A.; BURKARDT, N.; OHMER, M.; 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN ICED 05: Approaches for the Synthesis of Technical Systems within the Contact & Channel Model C&CM (2005)

ALBERS, 2005b

ALBERS, A.; KARRAR, C.; Reibschwingungen in trockenlaufenden Kupplungen und Bremsen, (2005b)

ALBERS; 2004

ALBERS, A.; BURKARDT, N.; OHMER, M.; PROCEEDINGS OF THE TMCE 2004: Principles for design on the abstract level of the Contact & Channel Model C&CM (2004)

ALBERS; 2002

ALBERS, A.; SAAK, M.; BURKARDT, N.: Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode : 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, 2002

ALINK, 2010

ALINK, T.: Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz. Karlsruhe, 2010

ANS, 1992

ANS, JEAN D.'.; LAX, ELLEN; LECHNER, M. D.: Taschenbuch für Chemiker und Physiker: Physikalisch-chemische Daten : Springer, 1992 — ISBN 9783540528951

ARDENNE, 2005

ARDENNE, MANFRED VON: Effekte der Physik und ihre Anwendungen : Harri Deutsch Verlag, 2005 — ISBN 9783817116829

BARANOV, 2007

BARANOV, VICTOR: Acoustic emission in friction : Elsevier, 2007 — ISBN 9780080451503

BARGEL, 2008

BARGEL, HANS-JA1/4RGEN; HILBRANS, HERMANN: Werkstoffkunde : Springer, 2008 — ISBN 9783540792963

BARRÉ, 1994

BARRÉ, S.; BENZEGGAGH, M.L.: On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene. In: Composites Science and Technology Bd. 52 (1994), Nr. 3, S. 369-376

BEHRENDT, 2009

BEHRENDT, MATTHIAS: Entwicklung eines Systemtribometers mit Abbildung mehrachsiger instationärer Beanspruchungskollektive zur Analyse von Reibung und Verschleiß im Mischreibungsbereich im Kontext naslaufender Umschlingungs-CVT. Schwetzingen, Stolzenberger Druck, Leimen, 2009

BELTZER, 1988

BELTZER, ABRAHAM I: Acoustics of solids. In: Berlin and New York, Springer-Verlag, 1988, 246 p. Bd. 1 (1988)

BELYI, 1981

BELYI, V. A.; KHOLODILOV, O. V.; SVIRIDYONOK, A. I.: Acoustic spectrometry as used for the evaluation of tribological systems. In: Wear Bd. 69 (1981), Nr. 3, S. 309–319

BHATIA, 1985

BHATIA, A. B.: Ultrasonic Absorption: An Introduction to the Theory of Sound Absorption and Dispersion in Gases, Liquids, and Solids : Dover Publications, 1985 — ISBN 0486649172

BOERJESSON, 1993

BOERJESSON, M. ; ERIKSSON, P. ; KUYLENSTIERNA, C. ; NILSSON, P H ; HERMANSSON, T.: THE ROLE OF FRICTION FILMS IN AUTOMOTIVE BRAKES SUBJECTED TO LOW CONTACT FORCES. In: , 1993 — ISBN 0-85298-853-2

BUSSIBA, 2008

BUSSIBA, A.; KUPIEC, M.; IFERGANE, S.; PIAT, R.; BÖHLKE, T.: Damage evolution and fracture events sequence in various composites by acoustic emission technique. In: Composites Science and Technology Bd. 68 (2008), Nr. 5, S. 1144–1155

COMSOL, 2011

COMSOL: Comsol. URL <http://www.comsol.com/products/multiphysics/>. - abgerufen 2011-11-30

CREMER, 1967

CREMER, LOTHAR; HECKL, MANFRED: Körperschall: physikalische Grundlagen und technische Anwendungen : Springer-Verlag, 1967

CZICHOS, 2010

CZICHOS, HORST; HABIG, KARL-HEINZ: Tribologie-handbuch: Reibung und Verschleiß : Vieweg +Teubner, 2010 — ISBN 9783834800176

DETERS 2008

Deters, L.: Tribologie. In Steinhilper, W.; Sauer, B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2 – Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben, 6. Auflage. Kap. 14. Berlin, Springer, 2008

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR METALLKUNDE, 1983

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR METALLKUNDE.; ZUM GAHR, K: Reibung und Verschleiss : Mechanismen, Prüftechnik, Werkstoffeigenschaften. Oberursel [Germany] : Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, 1983 — ISBN 9783883550640

DICKERHOF, 2011

DICKERHOF, MARKUS: Potentiale der Schallemissionsanalyse zur Überwachung und Diagnose tribologischer Systeme, 2011

DIN1320, 2009

DIN1320: *DIN 1320:2009-12: Acoustics - Terminology*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2009

DIN199-1, 2002

DIN199-1: DIN 199-1: Technische Produktdokumentation - CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2002

DIN6789-2, 2002

DIN6789-2: DIN 6789-2: Dokumentationssystematik - Dokumentsätze Technischer Produktdokumentationen. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2002

DOGOSSY, 2006

DOGOSSY, G.; CZIGÁNY, T.: Failure mode characterization in maize hull filled polyethylene composites by acoustic emission. In: Polymer Testing Bd. 25 (2006), Nr. 3, S. 353-357

FA. IAVF GMBH, 2010

FA. IAVF GMBH: Abschlussbericht Fa. IAVF Antriebstechnik GmbH - Fördermaßnahme – Innovationskompetenz II KF0267802LF7 : AiF, 2010

FANG, 2000

FANG, Q.; SIDKY, P. S.; HOCKING, G. M.: Cracking behaviours and stresses release in titanium matrix composites. In: Materials Science and Engineering A Bd. 288 (2000), Nr. 2, S. 142–147

FERSTL, 2003

FERSTL, FRANK: Reibung, Wärme, Verschleiß. 1. Aufl. : Shaker, 2003 — ISBN 3832215697

FILATOV, 1982

FILATOV, S.V.: Acoustic Emission in the Abrasive Wear of Metals., Soviet Journal of Friction and Wear (Nr. 3) : Acoustic Emission Group, 1982

Fleischer 1976

Fleischer, G.: Energiebilanzierung der Festkörperreibung als Grundlage zur energetischen Verschleißberechnung. Teil I/II, Schmierungstechnik 7 (1976) 8, Schmierungstechnik 7 (1976) 9, 1976

FRT, 2011

FRT: FRT Operating Manual MicroProf. URL <http://www.frt-gmbh.com/en/products/microprof/microprof/>. - abgerufen 2011-12-07

GAUGER, 1998

GAUGER, D.; INGENIEURE, VEREIN DEUTSCHER: Wirkmechanismen und Belastungsgrenzen von Reibpaarungen trockenlaufender Kupplungen : VDI-Verl., 1998 — ISBN 9783183301010

GEIER, 2009

Geier, M. ; Stier, C. ; Düser, T. ; Behrendt, M. ; Ott, S. ; Albers, A.: Simulationsgestützte Methoden – IDE und XiL zur Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten. In: *ATZ Automotive Engineering Partners* (2009), S. 48–53

GFT, 2002

GFT, 2002: GfT- Arbeitsblatt 7, GfT (2002)

GONZÁLEZ-NÚÑEZ, 2011

GONZÁLEZ-NÚÑEZ, MIGUEL A.: Correlation of Acoustic Emission with the Corrosion of Aluminium 6063alloy in 5% NaCl. In: . Cancum, Mexico, 2011

GRAFF, 1975

GRAFF, KARL F.: Wave motion in elastic solids : Courier Dover Publications, 1975 — ISBN 9780486667454

GREENPEACE, 2011

GREENPEACE: Feinstaub – HerdStrassenverkehr. URL http://www.greenpeace.at/uploads/media/Feinstaub-Herd_Strassenverkehr_Factsheet_01.pdf. - abgerufen 2011-12-15. — Feinstaub – Herd Strassenverkehr.

DE GROOT, 1995

DE GROOT, P. J; WIJNEN, P. A.M; JANSSEN, R. B.F: Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. In: *Composites science and technology* Bd. 55 (1995), Nr. 4, S. 405–412

GROßE, 1996

GROßE, CHRISTIAN: Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall, Universität Stuttgart, Text.Thesis.Doctoral, 1996.

GROTE, 2007

GROTE, KARL-HEINRICH; FELDHUSEN, JÖRG: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Aufl. : Springer Berlin Heidelberg, 2007 — ISBN 3540497145

HANCHI, 1991a

HANCHI, J.; KLAMECKI, B. E.: Acoustic emission monitoring of the wear process. In: *Wear* Bd. 145 (1991a), Nr. 1, S. 1–27

HANCHI, 1991b

HANCHI, J.; KLAMECKI, B.E.: Acoustic emission monitoring of the wear process. In: Wear Bd. 145 (1991b), Nr. 1, S. 1-27

HASE, 2008a

HASE, A.; WADA, M.; MISHINA, H.: The relationship between acoustic emissions and wear particles for repeated dry rubbing. In: Wear Bd. 265 (2008a), Nr. 5-6, S. 831–839

HASE, 2009

HASE, ALAN; MISHINA, HIROSHI; WADA, MASAKI: Acoustic Emission in Elementary Processes of Friction and Wear In- Situ Observation of Friction Surface and AE Signals. In: Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing Bd. 3 (2009), Nr. 4, S. 333-344

HASE, 2008b

HASE, ALAN; WADA, MASAKI; MISHINA, HIROSHI: Acoustic Emission Signals and Wear Phenomena on Severe-Mild Wear Transition. In: Tribology Online Bd. 3 (2008b), Nr. 5, S. 298-303

HASELBACH, 2003

HASELBACH, W.; LAUKE, B.: Acoustic emission of debonding between fibre and matrix to evaluate local adhesion. In: Composites Science and Technology Bd. 63 (2003), Nr. 15, S. 2155-2162

Hering, 2012

Hering, Ekbert ; Martin, Rolf ; Stohrer, Martin: *Physik für Ingenieure* : Gabler Wissenschaftsverlage, 2012 — ISBN 9783642225680

Hiersig, 1997

Hiersig, Heinz M.: *Lexikon Maschinenbau* : Gabler Wissenschaftsverlage, 1997 — ISBN 9783540621331

HENN, 2008

HENN, HERMANN; SINAMBARI, GH. REZA; FALLEN, MANFRED: Ingenieuraustik: Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele : Vieweg +Teubner, 2008 — ISBN 9783834802552

HISHAM, 2003

HISHAM A, ABDEL-AAL: On the interdependence between kinetics of friction-released thermal energy and the transition in wear mechanisms during sliding of metallic pairs. In: Wear Bd. 254 (2003), Nr. 9, S. 884-900

HONEYWELL FRICTION MATERIALS, 2010

HONEYWELL FRICTION MATERIALS: All you need, Honeywell Aftermarket Europe GmbH (2010)

IPEK, 2010

IPEK: Abschlussbericht IPEK - Fördermaßnahme – Innovationskompetenz II KF0398804LF7 : AiF, 2010

IRCAM, 2011

IRCAM: IRCAM. URL http://www.ircam.de/startseite/startseite_e.php. - abgerufen 2011-12-07

JHA, 1991

JHA, B. B.; RAJ, BALDEV; KHANNA, A. S.; BHATTACHARYA, D. K.; IYER, K. J. L.: Acoustic emission as a technique to study breakaway oxidation and spalling behaviour of 2.25Cr-1 Mo steel. In: Journal of Materials Science Bd. 26 (1991), Nr. 16, S. 4455-4460

JHA, 2009a

JHA, B.B.; MISHRA, B.K.; OJHA, S.N.: Spectrum Analysis of Acoustic Emission Signal Obtained during Breakaway Oxidation of 2.25Cr-1Mo Steel. In: Defect and Diffusion Forum Bd. 293 (2009a), S. 27-39

JHA, 2009b

JHA, B.B.; MISHRA, B.K.; OJHA, S.N.: Acoustic Emission during Isothermal Oxidation of 2.25Cr-1Mo Steel. In: Defect and Diffusion Forum Bd. 294 (2009b), S. 93-104

JIAA, 1990

JIAA, C. L.; DORNFELD, D. A.: Experimental studies of sliding friction and wear via acoustic emission signal analysis. In: Wear Bd. 139 (1990), Nr. 2, S. 403–424

KANANI, 2006

KANANI, NASSER: Werkstoffkunde für Oberflächentechniker und Galvaniseure: 700 Fragen und Antworten : Hanser Verlag, 2006 — ISBN 9783446407411

KARRAR, 2009

KARRAR, CARREL: Ein Beitrag zur Entwicklung, Dimensionierung und Prüfung trockenlaufender Kupplungen und Bremsen in Antriebsstrangsystemen im Hinblick auf die Vermeidung von Reibschwingungen, Karlsruher Institut für Technologie, 2009

KBA, 2011

KBA: KBA Motorisierung. URL http://www.kba.de/clin_031/nn_191088/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Motorisierung/n__motorisierung__pkw__zeitreihe__techn__merkmale.html. - abgerufen 2011-12-07

KISTLER, 2005

KISTLER: Datenblatt Piezotron® AE-Kuppler Typ 5125B (2005)

KISTLER, 2007

KISTLER: Datenblatt Piezotron® Acoustic Emission Sensor Typ 8152B (2007)

KLAMECKI, 1990

KLAMECKI, B. E.; HANCHI, J.: Wear Process Description Based on Acoustic Emission. In: Journal of Tribology Bd. 112 (1990), Nr. 3, S. 469-476

KLEINLEIN, 2005

KLEINLEIN, CLAUDIUS: Beschreibung von Reibpaarungen in trocken laufenden Kupplungen und Bremsen durch ihre globalen und lokalen Reibungs- und Verschleißigenschaften : VDI-Verl., 2005 — ISBN 9783183388011

KOLLER, 1994

KOLLER, R.; KASTRUP, N.: Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte. Berlin;Heidelberg : Springer — ISBN 3-540-58243-6, 1994

KOLLER, 1998

KOLLER, R.; RUDOLF: Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. 4. Aufl. : Springer Verlag, 1998 — ISBN 3-540-63037-6

KOLLMANN, 1999

KOLLMANN, FRANZ G.: Maschinenakustik: Grundlagen, Meßtechnik, Berechnung, Beeinflussung. 2. Aufl. : Springer Berlin Heidelberg, 1999 — ISBN 3540613447

KOMAI, 1991

KOMAI, K.; MINOSHIMA, K.; SHIBUTANI, T.: Investigations of the fracture mechanism of carbon/epoxy composites by AE signal analyses. In: JSME international journal. Ser. 1, Solid mechanics, strength of materials Bd. 34 (1991), Nr. 3, S. 381–388

KOTSIKOS, 2000

KOTSIKOS, G.; EVANS, J. T.; GIBSON, A. G.; HALE, J. M.: Environmentally enhanced fatigue damage in glass fibre reinforced composites characterised by acoustic emission. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Bd. 31 (2000), Nr. 9, S. 969–977

KRAGELSKI, 1971

KRAGELSKI, I.W.: Reibung und Verschleiß 4. Temperatur bei der Reibung 10. Werkstoffe mit großer Neigung zum Verschweißen (Friktionswerkstoffe). München : Carl Hanser Verlag, 1971 — ISBN 3446114742

KRENKEL, 2003

KRENKEL, WALTER: Keramische Verbundwerkstoffe : Wiley-VCH, 2003 — ISBN 9783527305292

KRIM, 1996

KRIM, J.: Reibung auf atomarer Ebene. In: , Spektrum der Wissenschaft. (1996), Nr. 12

KROPP, 2009

KROPP, WOLFGANG; MÖSER, MICHAEL; HECKL, MANFRED; CREMER, LOTHAR: Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen : Springer, 2009 — ISBN 9783540403364

KUMOSA, 1987

KUMOSA, M: Acoustic emission monitoring of stress corrosion cracks in aligned GRP. In: Journal of Physics D: Applied Physics Bd. 20 (1987), S. 69-74

LEUTE, 2004

LEUTE, ULRICH: Physik und ihre Anwendungen in Technik und Umwelt : Hanser Verlag, 2004 — ISBN 9783446228849

LIBSCH, 1978

LIBSCH, T. A: Microstructural changes in semimetallic disc brake pads created by low temperature dynamometer testing. In: Wear Bd. 46 (1978), Nr. 1, S. 203-212

LUK, 2009a

LUK, SCHAEFFLER FRICITON PRODUCTS GMBH: Datenblatt Reibmaterial B-8402 (2009a)

LUK, 2009b

LUK, SCHAEFFLER FRICITON PRODUCTS GMBH: Datenblatt Reibmaterial R-087 (2009b)

MACH, 2003

MACH, W: Tribomutationen bei der Endbearbeitung und ihre Auswirkungen auf das tribologische Verhalten während des Betriebes, 2003

MALISCHEWSKY, 2005

MALISCHEWSKY, PETER G: Comparison of approximated solutions for the phase velocity of Rayleigh waves (Comment on 'Characterization of surface damage via surface acoustic waves'). In: Nanotechnology Bd. 16 (2005), Nr. 6, S. 995-996

MALISCHEWSKY; 2009

MASER, MICHAEL: Technische Akustik : Springer, 2009 — ISBN 9783540713869

MATTHIESEN, 2002

MATTHIESEN, S.; FORSCHUNGSBERICHTE DES INSTITUTS FÜR MASCHINENKONSTRUKTIONSLEHRE UND KRAFTFAHRZEUGBAU: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme (2002)

MECHEFSKE, 2002

MECHEFSKE, C. K.; SUN, G.; SHEASBY, J.: Using acoustic emission to monitor sliding wear. In: Insight Bd. 44 (2002), Nr. 8, S. 490–497

MEYEN, 1991

MEYEN, HANS PETER: Acoustic Emission (AE) - Mikroseismik im Schleifprozess, 1991

MIETTINEN, 1996

MIETTINEN, J.; SIEKKINEN, V.: Acoustic emission in monitoring sliding contact behaviour. In: International Journal of Multiphase Flow Bd. 22 (1996), Nr. S1, S. 153

MITARIU-FALLER, 2009

MITARIU-FALLER: Methoden und Prozesse zur Entwicklung von Friktionssystemen mit Ingenieurkeramik am Beispiel einer trockenlaufenden Fahrzeugkupplung, 2009

MÜLLER, GERHARD, 2004

MÜLLER, GERHARD: Taschenbuch Der Technischen Akustik : Springer, 2004 — ISBN 9783540412427

NATIONAL INSTRUMENTS, 2010

NATIONAL INSTRUMENTS: NI 625x Specifications. URL <http://www.ni.com/pdf/manuals/371291h.pdf>. - abgerufen 2010-08-19

NEITZEL, 2004

NEITZEL, MANFRED; MITSCHANG, PETER: Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 1. Aufl. : Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG, 2004 — ISBN 3446220410

NI, 1997

NI, QING-QING; JINEN, EIICHI: Fracture behavior and acoustic emission in bending tests on single-fiber composites. In: Engineering Fracture Mechanics Bd. 56 (1997), Nr. 6, S. 779-796

OKOROAFOR, 1995

OKOROAFOR, E. U.; HILL, R.: Relating acoustic emission signal parameters to the strength of fibres used in the manufacture of polymeric composites. In: Ultrasonics Bd. 33 (1995), Nr. 2, S. 123–131

POESTE, 2005

POESTE, TOBIAS: Untersuchungen zu reibungsinduzierten Veränderungen der Mikrostruktur und Eigenspannungen im System Bremse. Berlin, Universität Berlin, 2005

POLZER, 1982

POLZER, GOTTLIEB; MEIßNER, FRANZ: Grundlagen zu Reibung und Verschleiss: mit 40 Tab : Dt. Verl. f. Grundstoffindustrie, 1982

POPOV, 2009

POPOV, V L: Kontaktmechanik Und Reibung: Ein Lehr- Und Anwendungsbuch Von Der Nanotribologie Bis Zur Numerischen Simulation : Springer, 2009 — ISBN 9783540888369

RAMIREZ-JIMENEZ, 2004

RAMIREZ-JIMENEZ, CR; PAPADAKIS, N.; REYNOLDS, N.; GAN, TH; PURNELL, P.; PHARAOH, M.: Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event. In: Composites science and technology Bd. 64 (2004), Nr. 12, S. 1819–1827

REISSNER, 2010

REISSNER, JOSEF: Werkstoffkunde für Bachelors : Carl Hanser Verlag, 2010 — ISBN 978-3-446-42012-0

REULEAUX, 1882

REULEAUX, F.: Der Konstrukteur – Ein Handbuch zum Gebrauch beim Maschine-Entwerfen, 1882

RODENACKER, 1991

RODENACKER, WOLF G.: Methodisches Konstruieren : Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele. Berlin ; Heidelberg [u.a.] : Springer, 1991

ROPOHL, G: *Einleitung in die Systemtechnik*. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1975

ROTH, 2000a

ROTH, KARLHEINZ: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 1: Konstruktionslehre. 3. Aufl. : Springer Berlin Heidelberg, 2000a — ISBN 3540671420

ROTH, 2000b

ROTH, KARLHEINZ: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 2: Kataloge. 3. Aufl. : Springer Berlin Heidelberg, 2000b — ISBN 3540670262

RUSSELL, 1977

RUSSELL, S.S.; HENNEKE, EG: Signature analysis of acoustic emission from graphite/epoxy composites (1977)

SANTNER, 2004

SANTNER, ERICH: Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen : tribologische Optimierung und Schadensbekämpfung. Renningen : Expert, 2004 — ISBN 9783816920762

SARRADJ, 1998

SARRADJ, ENNES: Hochfrequenter Körperschall in Strukturen. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik,, 1998

SARYCHEV, 1991

SARYCHEV, G. A.; SHCHAVELIN, V. M.: Acoustic emission method for research and control of friction pairs. In: Tribology international Bd. 24 (1991), Nr. 1, S. 11–16

SCHERGE, 2003

SCHERGE, M; PÖHLMANN, K; GERVÉ, A: Wear measurement using radionuclide-technique (RNT). In: Wear Bd. 254 (2003), Nr. 9, S. 801-817

SCHYR, 2006

SCHYR, CHRISTIAN: Modellbasierte Methoden für die Validierungsphase im Produktentwicklungsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Institut für Produktentwicklung, 2006

SELFRIDGE, 1985

SELFRIDGE, A. R: Approximate Material Properties in Isotropic Materials. In: IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics Bd. 32 (1985), Nr. 3, S. 381- 394

SEVERIN, 1995

SEVERIN, D.; MUSIOL, F.: Der Reibprozeß in trockenlaufenden mechanischen Bremsen und Kupplungen. In: Konstruktion Bd. 47 (1995), S. 59-68

SHAKHVOROSTOV, 2005

SHAKHVOROSTOV, D.: Untersuchung der Dissipationsmechanismen der Metall/Metall-Reibpaarung mit Hilfe der Radionuklidtechnik und faseroptischen IR-Temperaturmessung, Universitätsbibliothek, 2005

SOMMER, 2010

SOMMER, KARL; HEINZ, RUDOLF; SCHÖFER, JÖRG: Verschleiß metallischer Werkstoffe: Erscheinungsformen sicher beurteilen : Vieweg+Teubner Verlag, 2010 — ISBN 9783835101265

STACHOWIAK, 2005

STACHOWIAK, G.W; BATCHELOR, A.W: Engineering Tribology. USA : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005 — ISBN 978-0-7506-7836-0

STARR, 2001

STARR, ANDREW G.; RAO, RAJ B. K. N.: Condition monitoring and diagnostic engineering management (COMADEM 2001): proceedings of the 14th international congress, 4-6 September 2001, Manchester, UK : Elsevier, 2001 — ISBN 9780080440361

STURM, 1988

STURM, ADOLF; FÖRSTER, RUDOLF: Maschinen- und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung : Verlag Technik, 1988 — ISBN 9783341006221

SUH, 1992

SUH, K.S.; LEE, C.R.; PARK, K.H.; PARK, J.W.: In-situ Monitoring of Failure and Fracture Mechanisms in Carbon Fiber/Epoxy Composite by an Optical Fiber Sensor. In: Polymer (Korea) Bd. 16 (1992), Nr. 1, S. 15–21

SUZUKI, 1991

SUZUKI, M.; KIDA, S.; SHIMBO, M.; MIYANO, Y.; MOROHASHI, S.: Effects of fiber content on fracture mechanisms of short fiber reinforced PET composites. In: Composites (1991)

SUZUKI, 1989

SUZUKI, M.; NAKANISHI, H.; IWAMOTO, M.; JINEN, E.: Application of static fracture mechanisms to fatigue fracture behavior of class A-SMC composite. In: Japan-U. S. Conference on Composite Materials, 4 th, Washington, DC, 1989, S. 297–306

TIETZ, 1969

TIETZ, HORST-DIETER: Ultraschall-Messtechnik : Verlag Technik, 1969

TIMMERS, 2001

TIMMERS, REGINE: Schallemissionsuntersuchungen bei LCF-Versuchen an Baustahl St 52, 2001

TKACHUK, 2009

TKACHUK, PETRO; STRACKELJAN, JENS; DOGUER, TAHSIN: Simulation von Wälzlagerschäden. In: Серія Машинобудування Bd. 57 (2009), S. 56-62

UMWELTBUNDESAMT, 2011

UMWELTBUNDESAMT: Emissionen des Verkehrs. URL <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodent=3577>. - abgerufen 2011-12-15. — Emissionen des Verkehrs

VDI, 1993

VDI, VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: Dämpfung und Nichtlinearität: Phänomene, Probleme und Lösungen : Tagung Darmstadt, 12. und 13. Oktober 1993 : VDI-Verl., 1993 — ISBN 9783180910826

VDI, 1997

VDI, VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: Kupplungen in Antriebssystemen '97: Problemlösungen, Erfahrungen, Trends : Tagung Fulda, 3. und 4. März 1997 : VDI, 1997 — ISBN 9783180913230

VDI3830-1, 2004

VDI3830-1: VDI 3830 Blatt 1: Werkstoff- und Bauteildämpfung;Einteilung und Übersicht. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2004

VDI3830-3, 2004

VDI3830-3: VDI 3830 Blatt 3: Werkstoff- und Bauteildämpfung;Dämpfung von Baugruppen. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2004

WALTHER, 2004

WALTHER, G.; SCHNEIDER, L.; DIEMER, M.: Tribologische Prüfung von Reibpaarungen für Kfz-Kupplungen. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik Bd. 35 (2004), Nr. 10-11, S. 638-644

WEISSBACH, 2010

WEISSBACH, WOLFGANG: Werkstoffkunde : Strukturen, Eigenschaften, Prüfung mit 246 Tabellen. 17. Aufl. Wiesbaden : Vieweg Teubner, 2010 — ISBN 9783834807397

ZENNER, 1980

ZENNER, P.: Modellvorstellungen zur Entstehung von Schallemission bei der Belastung von Werkstoffen : Fraunhofer-Inst. f. Zerstörungsfreie Prüfverfahren, 1980

ZHUANG, 2006

ZHUANG, XINGMIN; YAN, XIONG: Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission. In: Composites Science and Technology Bd. 66 (2006), Nr. 3-4, S. 444-449

Gesellschaft für Tribologie, 2011

Gesellschaft für Tribologie. URL <http://www.gft-ev.de/tribologie.htm>. - abgerufen 2011-04-18

FH-Vorarlberg, 2011

FH-Vorarlberg. URL https://homepages.fhv.at/hs/Konstruktionsmethodik/Kap_02/TechnSys.htm. - abgerufen 2011-04-25. — Vorarlberg, Fachhochschule. Technische Systeme.

OELCHEK GmbH, 2011

OELCHECK GmbH: Optische Partikel-Analyse, O.P.A. , Partikelzählung. URL <http://www.oelcheck.de/wissen-von-a-z/pruefverfahren-und-geraete/opa-optische-partikelanalyse.html>. - abgerufen 2011-12-23

10 Anhang

Technische Daten Thermografiekamera

Detektor-Typ	Cadmium-Quecksilber-Tellurid (CMT) Focal Plane Array (FPA)
Abmessungen (ohne Objektive)	240 x 150 x 120 mm
Format	327 680 (640x512) Pixel
Spektralbereich	8.0 - 12.0 μm
Spektralband	LWIR
Bilddatenrate	62.5 MByte/s
Pixelrate	31.25 MPixel/s
Vollbild-Frequenz	100 Hz
Integrationszeit	0 .. 1 ms (einstellbar)
NETD	<20 mK
A/D Auflösung	14 Bit
Teilbild-Fähigkeit	variabel
Teilbild-Frequenz	N/A
Daten-Schnittstelle	Camera Link / MIO
Kühlung	Rotary
Optionen	Filterrad, Motorfokus, Gigabit Ethernet (GigE)

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Simon Gábor Kelemen

Geburtsdatum: 05. August 1982

Geburtsort: Karlsruhe

Staatsangehörigkeit: deutsch

Familienstand: verheiratet

Bildungsgang

1990 – 1994 Eichendorff Schule (Grundschule)

1994 – 2002 Otto-Hahn-Gymnasium (Abschluss: Abitur)

2002 – 2007 Studium des Maschinenbaus mit Vertiefungsrichtung Mikrosystemtechnik und Mechatronik an der Universität Karlsruhe (TH) (Abschluss: Diplom)

Berufstätigkeit

2002 – 2007 Wissenschaftliche Hilfskraft am Fraunhofer ISI – Institut Systemtechnik und Innovation

2006 – 2007 Wissenschaftliche Hilfskraft am wbk – Institut Produktionstechnik am KIT

2007 Wissenschaftliche Hilfskraft am IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT

seit 11/2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK - Institut für Produktentwicklung am KIT