

Sebastian Gramstat

**Methoden der in-situ Visualisierung der Reibzonedynamik
trockenlaufender Reibpaarungen unter Ergänzung
physikalischer und chemischer Charakterisierungen der
Reibpartner**

Kraftfahrzeugtechnische Berichte
Herausgegeben von Prof. Dr. Klaus Augsburg
Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik an der
TU Ilmenau

Band 7

**Methoden der in-situ Visualisierung der
Reibzonedynamik trockenlaufender
Reibpaarungen unter Ergänzung
physikalischer und chemischer
Charakterisierungen der Reibpartner**

Sebastian Gramstat



Universitätsverlag Ilmenau
2015

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau als Dissertation vorgelegen

Tag der Einreichung: 28. Januar 2014

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Augsburg
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Linß
(Technische Universität Ilmenau)

3. Gutachter: Dr.-Ing. Werner Österle
(Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin)

Tag der Verteidigung: 25. Juli 2014

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISSN 1865-0880 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-86360-107-2 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014000338

Titelfoto: Veit Henkel | Fakultät für Maschinenbau, TU Ilmenau

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik der Technischen Universität Ilmenau entstanden.

Ganz besonderer Dank gilt an erster Stelle meinem Doktorvater und Fachgebietsleiter, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Augsburg, ohne den diese Arbeit nicht hätte entstehen können. Seine Visionen, das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie seine enorme Unterstützung ließen ihn für mich zu einem Mentor werden, der die Arbeit und mich persönlich außerordentlich stark geprägt hat.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, dem Leiter des Fachgebietes Qualitätssicherung und Industrielle Bildverarbeitung an der TU Ilmenau, sich als Gutachter für die vorliegende Arbeit zur Verfügung gestellt zu haben. Ebenso gilt Herrn Dr.-Ing. Werner Österle von der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) großer Dank für die Übernahme der Begutachtung.

Den Kollegen des Fachgebietes Kraftfahrzeugtechnik möchte ich ebenso meinen besonderen Dank aussprechen. In ihnen fand ich stets inhaltliche und technische, aber auch moralische Unterstützung, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Neben den Kollegen aus der mechanischen Werkstatt wie die Herren Viktor Beez, Falk Amling, Thomas Klein und Achim Kuhne, sei ein großer Dank an Herrn Michael Posselt gerichtet, der immer ein offenes Ohr hatte und eine Bitte immer erfüllte. Auch bei Dipl.-Phys. Karl-Heinz Müseler möchte ich mich herzlich bedanken. Er unterstützte mich bei meiner Arbeit, aber auch in vielen privaten Fragestellungen waren mir seine Ratschläge wertvoll. Sein motivierender und sympathischer Umgang hat gerade die finale Phase der Bearbeitung positiv beeinflusst. Den Damen des Fachgebietes, Frau Doris Gebser und Frau Madlen Schmelcher, möchte ich nicht nur für ihre Unterstützung in so vielen organisatorischen Fragen danken, sondern auch

dafür, daß das Arbeitsklima immer ein angenehmes war und wir alle uns am Fachgebiet sehr wohl gefühlt haben.

Nicht vergessen werden darf die Unterstützung, welche ich durch die Betreuung zahlreicher studentischer Arbeiten erfahren habe. Auch wenn nicht alle Namen Erwähnung finden können, sei besonders den Herren Daniel Martin, Martin Espig, Benjamin Stengl und Benjamin Schellakowsky für ihre Beiträge und ihr überdurchschnittliches Engagement gedankt.

Meinen Eltern, Joachim und Karin Gramstat, bin ich zu dem wohl größten Dank verpflichtet. Ohne ihre Unterstützung während meiner Ausbildungszeit, meiner beruflichen Tätigkeit am Fachgebiet und der Bearbeitungsdauer der Dissertation ist die vorliegende Arbeit nicht denkbar. Eine stetige Motivation und Fürsprache verdanke ich ebenso meiner Freundin Liza, die mir auch in schwierigen und zweifelnden Momenten immer die notwendige Kraft gab, die Arbeit fertigzustellen.

Sebastian Gramstat

Ilmenau, im Januar 2014

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Wissenschaftliche Zielstellung.....	3
3	Stand der Technik	7
3.1	Reibmechanismen – Modelle und Charakterisierungen.....	7
3.2	Oberflächenanalysen	28
3.3	Klassifizierungsansätze.....	32
3.4	Analysen der Reibbelagkompressibilität	39
3.5	Analysen der Reibbelagporosität	44
3.6	Charakterisierungs- und Klassifizierungsmethoden.....	49
3.6.1	Digitale Videoanalyse.....	50
3.6.2	Bildverarbeitende Objekterkennung.....	52
3.6.3	Bildverarbeitende Objektverfolgung.....	57
3.6.4	Bewegungsanalyse.....	62
3.6.5	Bewegungsparameter und statistische Analysen	63
4	Forschungsbedarfe.....	67
5	Aufgabenpräzisierung	74
6	Experimentelle Prüfumgebung.....	78
6.1	Flexibles Tribologie Modul (FTM)	78
6.2	Prüflinge.....	81
6.2.1	Bremsscheibe.....	82
6.2.2	Reibbelag	85
6.3	Prüfprozedere.....	86
7	Visualisierungsuntersuchungen zum in-situ Reibverhalten	88
7.1	Lokales Patchverhalten	88

7.1.1	Initialverhalten	89
7.1.2	Einzelbremsung	96
7.1.3	Bremssequenz	109
7.2	Lokales Partikelverhalten	117
7.2.1	Charakterisierung von Partikelbahnen	120
7.2.2	Analyse der Partikelgrößenverteilungen	128
7.2.3	Analyse des Bewegungsverhaltens.....	130
7.3	Möglichkeiten lokaler Patch- und Partikelanalysen unter Verwendung segmentierter Graugußscheiben (SGG)	136
7.3.1	Lokale Patchanalysen bei Nutzung einer SGG.....	136
7.3.2	Lokale Partikelanalysen bei Nutzung einer SGG.....	139
7.4	Lokales Patch- und Partikelverhalten unter globalem Bezug	142
7.5	Globales Patch- und Partikelverhalten.....	156
7.5.1	Kontaktverhältnisse bei trockenlaufenden Reibpaarungen ...	158
7.5.2	Kontaktverhältnisse unter Nässeeinwirkung	168
7.5.3	Thermoelastische Instabilitäten (TEI)	179
8	Tribologische und physikalisch- / chemische Untersuchungen	193
8.1	Charakterisierungen des Reibverhaltens	193
8.1.1	Schleppbremsung.....	193
8.1.2	Stopbremsung.....	198
8.1.3	Vergleich mit einer Referenzbremse	200
8.2	REM / EDX – Untersuchungen	204
8.2.1	Grüne Reibpartner	204
8.2.2	Glasversuche	210
8.2.3	Versuche Referenzbremse.....	218

8.3	Topographie – Charakterisierungen	223
8.4	Kompressibilitätsuntersuchungen	231
8.5	Porositätscharakterisierungen	235
8.5.1	Meßverfahren	236
8.5.2	Defektstellenanalyse	237
8.5.3	Datenaufbereitung	238
8.5.4	Datenanalyse	239
8.5.5	Besonderheiten der Methodenentwicklung	240
8.5.6	Ergebnisse	243
9	Zusammenfassung	248
10	Ausblick	262
11	Literaturverzeichnis	264
12	Eigene Veröffentlichungen und Vorträge	279
13	Anhang	284

Abkürzungen

Abkürzung Bedeutung

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BG	Baugruppe
CT	Computer Tomograph
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DTV	Disc Thickness Variation (engl.) - Scheibendickenschwankung
ECE	Economic Comission for Europe (engl.) - Reibbelag für den europäischen Markt (low met)
ECE-kf	kupferfreier ECE-Belag
ECE-mk	kupferhaltiger ECE-Belag
EDX	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (engl.) - Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EN	Europäische Norm
EPMA	Electron Probe Microanalyzer (engl.) - Elektronenstrahlmikroanalyse
FIB	Focused Ion Beam (engl.) - fokussierter Ionenstrahl
fps	Frames per Second (engl.) - Bild pro Sekunde, Bildabtastrate
FTM	Flexibles Tribologie Modul
GGs	Graugußscheibe
HSB	Hue Saturation Brightness (engl.) - Farbwert Sättigung, Helligkeit
HSI	Hue Saturation Intensity (engl.) - Farbwert, Sättigung, Intensität
HSV	Hue Saturation Value (engl.) - Farbwert, Sättigung, Hellwert
IDS	Institut für Dynamik und Schwingungen
ISO	International Organisation for Standardization (engl.) - Internationale Organisation für Normung

JIS	Japan Industrial Standard (engl.) - Japanische Industrienorm
LM	Lichtmikroskop
MP	Meßpunkt
MPU	Metal Pick Up (engl.) - Metalleintrag
NAO	Non-Asbestos Organic (engl.) - asbestfreier, organischer Reibbelag
NVH	Noise Vibration Harshness (engl.) - Geräusche, Schwingungen, Rauheiten
PIV	Particle Image Velocimetry (engl.) - Partikelgeschwindigkeitsermittlung mittels Fotoaufnahmen
PM	Particulate Matter (engl.) - Partikelgrößenfraktion
PT	Potassium Titanate (engl.) - Kaliumtitanat
REM	Rasterelektronenmikroskop
RGB	Rot Grün Blau - Farbraum
ROI	Region of Interest (engl.) - Bereich von Interesse
SAE	Society of Automotive Engineers (engl.) - Gesellschaft der Automobilingenieure
SDOF	Single Degree of Freedom (engl.) - Freiheitsgrad Eins
SEM	Scanning Electron Microscope (engl.) - Rasterelektronenmikroskop
SGG	Segmentierte Graugußscheibe
SGG _e	Graugußscheibe mit ebenen Glassegmenten
SGG _v	Graugußscheibe mit versetzten Glassegmenten
SIM	Scanning Ion Microscope (engl.) - Rasterionenmikroskop
SN	Step Number (engl.) - Schrittnummer, Bremsungsnummer
SNR	Signal to Noise Ratio (engl.) - Signal-Rausch-Verhältnis
TEI	Thermoelastic Instability (engl.) - Thermoelastische Instabilität
TEM	Transmission Electron Microscope (engl.) - Transmissionselektronenmikroskop
VGS	Vollglasscheibe

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\dot{\mu}$	-	dynamischer Reibkoeffizient
μ_k	-	kinetischer Reibwert
μ_s	-	statischer Reibwert
A_{Druck}	mm^2	druckbelastete Fläche
a_{eff}	-	effektiver Mittelwert
A_{nom}	mm^2	nominelle Fläche
A_p	μm^2	Patchfläche
A_{Zug}	mm^2	zugbelastete Fläche
C_F	-	Crest-Faktor
f	-	arithmetischer Mittelwert
f_1	-	Funktion des Patchwachstumsverhaltens
f_2	-	Funktion des Patchzerfallverhaltens
F_N	N	Normalkraft
F_R	N	Reibkraft
F_s	N	statische Kraft
k_2	-	Korrelationsfaktor patchzerstörende Einflüsse
k_3	-	Korrelationsfaktor Patchgröße / -alter
k_5	-	Wachstumsrate
M_B	Nm	Bremsmoment
n	U/min	Drehzahl
p	bar	Bremsdruck
p_F	N/mm^2	Flächenpressung
P_R	W	Reibleistung
r_{xy}	-	Korrelationskoeffizient
S	-	Standardabweichung
t	s	Zeit
T_{mitte}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur mittlerer Reibring

T_{oben}	°C	Temperatur äußerer Reibring
T_{unten}	°C	Temperatur innerer Reibring
T_p	°C	mittlere Patchtemperatur
var	-	Varianz
v_R	m/s	Relativgeschwindigkeit
W	J	mittlere spektrale Energie
σ_0	N/mm ²	Eindruckhärte
τ_c	N/mm ²	Tangentialspannung

1 Einleitung

Trockenlaufende Reibungsbremsen sind in vielen industriellen Anwendungen Stand der Technik und tragen zur Bedeutung von Verkehrs-, Transport- und Fördersystemen wie Eisenbahnen, Kraftfahrzeugen oder Transportkränen entscheidend bei. Sie sind sicherheits- und in verschiedenen Anwendungen auch komfortrelevante Komponenten und sollen Bewegungsenergie in thermische Energie möglichst effizient umwandeln. Ihre Bedeutung ist auch zukünftig mit der zunehmenden Elektrifizierung und der damit einhergehenden Absicht, Bewegungsenergie generatorisch (rekuperativ) abzubauen, sehr groß. Insbesondere bei großen bewegten Massen, zudem in Kombination mit hohen Geschwindigkeiten, ist die Reibungsbremse unverzichtbar, um in möglichst kürzester Zeit (z.B. in einer Gefahrensituation) zu verzögern.

Obgleich das Prinzip ein sehr altes und bekanntes ist, wurden die größten Fortschritte im Bereich der Bremsen- und Reibwerkstoffentwicklung in den vergangenen sechs Dekaden erzielt. Dennoch besteht ein bis heute großer Forschungsbedarf, um das Reibverhalten umfassend charakterisieren zu können. Weder ist es heute möglich, das tribologische Verhalten umfassend zu modellieren, noch werden zahlreiche Phänomene vollständig in ihrer Entstehung und den Wirkmechanismen verstanden (wie z.B. Metal Pick Up, Knarzen, Quietschen, Naß- und Kaltreibwertverhalten).

Demnach bestehen große Optimierungspotentiale in Bezug auf drei zentrale Zielgrößen (Leistungsfähigkeit, Verschleißverhalten, Komfortverhalten), die bei der Entwicklung von Radbremsen zu beachten sind. Die Leistungsfähigkeit soll möglichst maximiert werden, so daß hohe und vor allem konstante Reibwerte für jeden Betriebszustand erzielt werden. Dies liefert einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der aktiven Fahrsicherheit und der Forderung nach der Verringerung von Verkehrsunfällen. Die Verschleißvolumina sind zu minimieren, um die Betriebskosten von Fahrzeugen zu senken und speziell bei kommerziell genutzten Fahrzeugen die durch Bremsenwartungen bedingten Standzeiten

zu verringern. Auch bedeuten geringere Verschleißvolumina eine verringerte Emission von Feinstpartikeln, was ökologisch äußerst bedeutsam ist. Neben der Feinstaubbelastung ist auch das Komfortverhalten, speziell das Schwingungs- und Geräuschverhalten, für die ökologische Qualität einer Radbremse wichtig. In urbanen Regionen ist die Geräuschemission durch den Straßenverkehr sehr hoch, weshalb weitere Belastungen durch z.B. quietschende Reibungsbremsen vermieden werden sollen. Ebenso ist die akustische Qualität einer Radbremse ein wichtiges Qualitätskriterium für den potentiellen Fahrzeugkäufer. Eine geräuscharme Bremse ist folglich ein zentrales Ziel der Bremsenentwicklung, welches durch das gezielte Beeinflussen des tribologischen Verhaltens erfüllt werden kann.

Die vorliegende Arbeit zielt speziell auf Reibsysteme aus dem Bereich der Personenkraftwagen ab und möchte dazu beitragen, deren Wirkmechanismen besser zu verstehen und zu beschreiben. Obgleich es zahlreiche Forschungsarbeiten zu diesem Thema bereits gibt, bietet besonders das Verhalten in der Reibzone während der Bremsung ein großes Forschungspotential, da hochdynamische und –auflösende in-situ Untersuchungen bislang nicht erfolgt sind. Durch ein besseres Verständnis der tribologischen Wirkmechanismen wird es möglich sein, die genannten Optimierungspotentiale für wichtige Zielgrößen der Radbremsentwicklung umzusetzen, indem das Reib- und Verschleißverhalten über die Reibbelagzeptur und -gestaltung gezielt eingestellt wird. Da dies bisherige „Trial and Error“ Ansätze in der Reibbelagentwicklung ersetzen kann, sind auch Effizienzsteigerungen für den Radbremsentwicklungsprozeß wahrscheinlich.

2 Wissenschaftliche Zielstellung

Die wissenschaftliche Zielstellung der vorliegenden Arbeit betrifft die Beschreibung und Charakterisierung der tribologischen Wirkmechanismen trockenlaufender Reibpaarungen von Pkw-Radbremsen in einer neuen Qualität. Die Tribologie selbst ist in die Bereiche Reibung, Verschleiß und Schmierung gemäß [1] zu unterteilen. Daneben steht sie in direktem Zusammenhang zu Aspekten des Geräusch- und Schwingungsverhaltens (NVH – engl.: Noise Vibration Harshness) der Reibpaarung, da diverse Störerscheinungen reibinduziert sind. Die Tribologie beschäftigt sich mit der Betrachtung von aufeinanderwirkenden Oberflächen in Relativbewegung (Abb. 2.1). Dabei treten zwischen Grund- und Gegenkörper (im Falle der zu betrachtenden Reibbremse sind dies der Rotor bzw. die Bremscheibe sowie der Stator bzw. der Bremsbelag) Grenzflächenwechselwirkungen auf, die einen Zwischenstoff, der auch als Zwischen- oder Grenzschicht bekannt ist, entstehen lassen können.

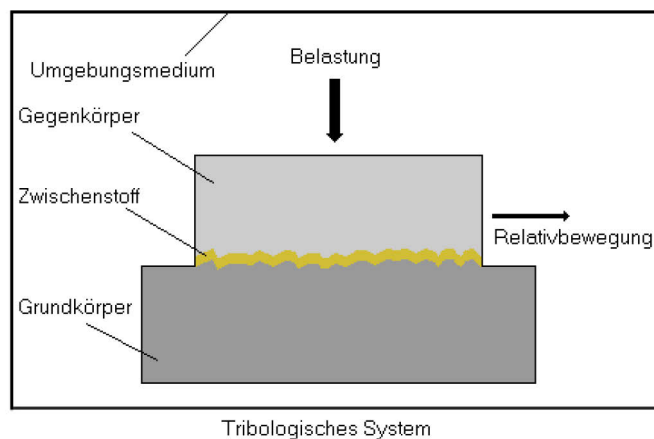


Abb. 2.1: Aufbau eines tribologischen Systems nach [1]

Diese Grenzschicht wirkt wie ein zusätzlicher Reibkörper, weshalb er auch häufig als dritter Reibkörper (engl.: Third Body) bezeichnet wird, und setzt sich aus der sogenannten Reibschicht und dem Reibfilm zusammen. Erstere wird aus den Abriebprodukten Verschleißpartikel und den Patches gebildet. Als Patch bzw. auch als Plateau bezeichnet man einen zumeist erhabenen Bereich, der für die Reibkraftübertragung verantwortlich zeichnet. Hierbei

ist in Primär- und Sekundärpatch zu unterscheiden. Während der Primärpatch einen äußerst robusten und mechanisch widerstandsfähigen Bestandteil der Belagmatrix meint (z.B. Eisenspäne), stellt der Sekundärpatch einen aus Abriebpartikeln bestehenden verfestigten Bereich dar, der mechanisch weniger robust ist und sich erst im Laufe des Reibprozesses ausbildet. Die Abrieb- bzw. Verschleißpartikel können hierbei zwei verschiedenen Mechanismen unterliegen. Zum einen werden sie aus einem der beiden Reibpartner herausgelöst und sind diesem chemisch daher zuzuordnen. Zum anderen können solche Partikel aus der Reibschicht gelöste Bestandteile sein, die somit chemisch gesehen beiden Reibpartnern zugewiesen werden können. Die Reibfilme indes sind immer dünne Reaktionsschichten (ca. 100 nm dick) beider Reibpartner mit Sauerstoff aus der Luft. Entscheidend für die Ausprägung des dritten Reibkörpers ist ein tribologischer Einlaufvorgang (engl.: bedding), innerhalb dessen die Grenzschicht entsteht und sich ein stationäres Reibwertverhalten einstellt. Der Verschleiß der Reibpaarung ist in der Regel während des Beddings erhöht und verringert sich durch die vorhandene Zwischenschicht.

Die tribologischen Wirkmechanismen sollen mit Hilfe sogenannter in-situ Visualisierungsversuche zur Bestimmung des Partikel- und Patchverhaltens untersucht werden. Dies geschieht während des Reibvorgangs ohne zeitlichen Verzug und unter Verwendung einer speziellen Prüfumgebung (damit handelt es sich um eine in-situ – in (natürlicher) Lage – Betrachtung). Da die eigentliche Reibzone, der Schnittstellenbereich beider primärer Reibpartner, bei klassischen und konventionellen Reibpaarungen (Grauguß-Bremsscheibe – organischer Reibbelag) optisch nicht zugänglich ist, sind Veränderungen bzw. Anpassungen der Prüflinge vorzunehmen. Die wissenschaftliche Vision hat daher ebenso den Nachweis der Übertragbarkeit der auf diese Art und Weise gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse auf konventionelle Reibpaarungen zu erbringen. Die Betrachtung innovativer, alternativer Reibkonzepte (wie z.B. C/SiC

Bremsscheiben) soll nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit sein. Ebenfalls sollen ergänzende Charakterisierungen die Oberflächenphysik (Topographie) und –chemie betreffend in einer ausreichend hohen Ortsauflösung vorgenommen werden, um die lokalen Besonderheiten der Reibschicht begründen und erklären zu können. Der Komplexität der Zusammensetzung des dritten Reibkörpers ist es geschuldet, daß die vorliegende Arbeit sich auf die Charakterisierung der Reibschicht konzentriert, während Reibfilmanalysen Gegenstand zukünftiger Forschungsaktivitäten sein sollen, die im Rahmen von nachfolgenden Arbeiten durchgeführt werden. Die in-situ Visualisierungsversuche sollen aufgrund der Komplexität zunächst auch nur auf die Reibung und den Verschleiß angewendet werden. Im Falle der erfolgreichen Umsetzung sind dann im Anschluß Anwendungen für NVH-Fragestellungen ebenfalls durch nachfolgende Arbeiten anzustreben.

Die zu entwickelnden Methoden haben verschiedene Größenskalen zu berücksichtigen, da die Tribologie als Multiskalenproblem zu verstehen ist. Daher haben die Analysen bzw. Analysemethoden die Nano-, Mikro- und Makroskala zu berücksichtigen. Daraus ergibt sich im weiteren die Verbindung lokaler mit globalen Betrachtungen, die den Übergang von Patch – Patchzone – Reibzone bedeuten, was dem Übergang der Skalenbereiche Mikro – Makro entspricht. Konkret werden mit lokalen Analysen Reibzonenausschnitte von ca. 2,5 x 2,5 mm verbunden, während globale Betrachtungen stets die vollständige Reibzone (gleich der Reibelagoberfläche) berücksichtigen.

Es sollen dezidiert dynamische Prozesse beobachtet (qualitativ) und charakterisiert (quantitativ) werden, um Reib- und Verschleißvorgänge zu beschreiben. Gegenstand der Betrachtungen sind die Partikel- und Patchdynamik. Erstere berücksichtigt die Abriebpartikel in der Reibzone, die hinsichtlich ihrer Entstehung und ihres Bewegungsverhaltens in Bezug auf ihre Verteilungen (Größen und Geschwindigkeiten) untersucht werden. Bei der Patchdynamik sind Patchentstehung, -existenz und –zerfall zu

charakterisieren. Ebenso soll die Dynamik der Flächenpressungsverhältnisse untersucht werden („wandernder Reibring“), wie auch das Patchverhalten zwischen Phasen mit und ohne Druckapplikation (engl.: on / off brake).

Eine weitere Zielstellung betrifft neben der Oberflächentopographiecharakterisierung zusätzliche Aspekte der Reibbelagphysik. Gemeint ist eine Erweiterung von globalen, integrativen physikalischen Analysen zu lokal orts aufgelösten Charakterisierungen. Auch hierfür gilt, daß die globale Analyse die vollständige Reibzone meint, während sich die lokalen Betrachtungen auf sehr viel kleinere Reibzonenausschnitte beziehen. Diese lokalen physikalischen Eigenschaften sollen als Hilfsgröße für die lokale bzw. globale Partikel- und Patchdynamik dienen und mögliche Korrelationen zu diesen aufzeigen. Methodisch wird angestrebt, verschiedene Ansätze, die sich auch in ihrer Erkenntnistiefe unterscheiden, zu berücksichtigen. Somit soll der Bogen über die Charakterisierung der Belagtopographie, der Belagkompressibilität (2D) bis hin zur Belagporosität (3D) gespannt werden.

Mit diesen Erkenntnissen soll es zum einen ermöglicht werden, bestehende Reibmodelle speziell vor dem Hintergrund des thermo-mechanischen Verhaltens zu bestätigen. Zum anderen soll ein Unterstützungswerkzeug bei der Auswahl von Reibbelagmaterialien in Form eines Belagfingerprints hinsichtlich tribologischer, physikalischer und chemischer Eigenschaften geschaffen werden.

Nur mit einem solch domänenübergreifenden Methodenansatz (Tribologie, Physik, Chemie) wird es dem Entwickler von Reibbelägen möglich sein, das Verhalten des dritten Reibkörpers zu verstehen und prädiktiv beschreiben zu können. Gleichzeitig sollen die neuen Methoden der Charakterisierung geeignet sein, bisherige und zukünftige Modellierungsansätze zum tribologischen Verhalten besser als bislang zu parametrisieren und zu validieren.

3 Stand der Technik

3.1 Reibmechanismen – Modelle und Charakterisierungen

Im folgenden Teilkapitel werden bisherige Arbeiten zur Charakterisierung von Reibmechanismen (inklusive entsprechender Reibmodelle) sowie dem thermischen Verhalten vorgestellt.

Historisch gesehen war es **Da Vinci**, der sich als Erster Untersuchungen zu trockener Reibung zwischen festen Körpern widmete. Trockene Reibung ist ein überaus komplexer Vorgang, der nicht nur der Unterscheidung in elastische und plastische Deformation bedarf, sondern auch Wechselwirkungen mit einer Zwischenschicht, Mikrobrüche, chemische Reaktionen, Anregung von Elektronen und Photonen sowie die Übertragung von Teilchen von einem Körper zu einem anderen berücksichtigt. Da Vinci beobachtete das Verhalten eines gleitenden Körpers auf einer schiefen Ebene und bestimmte den Winkel einer geneigten Ebene, ab der ein Körper zu rutschen beginnt.

Euler erkannte nach ihm Unterschiede zwischen Haft- und Gleitreibung, die **Coulomb** im weiteren mathematisch beschreiben konnte und der die statischen und kinetischen Reibungskoeffizienten einführte. Demnach muß eine kritische Kraft F_S überwunden werden, um einen Körper aus seinem Ruhezustand zu bringen (Gleichung (3.1)):

$$F_S = \mu_s * F_N \quad (3.1)$$

Will man den Körper in Bewegung versetzen, ist eine Widerstandskraft F_R aufzubringen, die nach der Überwindung der Haftung wirkt (Gleichung (3.2)):

$$F_R = \mu_k * F_N \quad (3.2)$$

Als gute, jedoch grobe Näherung wird angenommen, daß die Reibungskoeffizienten nicht von der Relativgeschwindigkeit abhängen. Für große und kleine Geschwindigkeitswerte zeigen sich aber oftmals Abhängigkeiten (fallende Reibwerte für steigende Geschwindigkeiten), die beispielsweise zu Reibungsinstabilitäten führen können. Auch die

Rauheiten der Oberflächen sollten berücksichtigt werden, da Verunreinigungen oder flüssige Zwischenschichten im tribologischen Kontakt die Reibung nachhaltig beeinflussen können. [3], [4]

Erste Arbeiten, die die Reibung von Festkörpern auf die atomare Skala beziehen und die plastische Deformation von Kristallen beschreiben, sind mit dem **Prandtl-Tomlinson Modell** zu nennen. Es betrachtet die Wechselwirkung zwischen Molekülen an den aneinander gleitenden Oberflächen zweier ungeschmierter Körper und stellt ein minimalistisches Modell dar, welches zwei wesentliche Grundeigenschaften der Reibung berücksichtigt. Zum einen wird die Wirkung einer periodischen, konservativen Kraft um den Mittelwert Null auf einen Körper beschrieben, so daß Haftung begründet werden kann. Zum anderen wird eine geschwindigkeitsabhängige dissipative Kraft berücksichtigt, die als Dämpfung die Voraussetzung für die Ausprägung einer makroskopischen Reibkraft darstellt. [4]

Dieses Modell als Basis nutzend, widmet sich das **Bowden-Tabor Modell** der Erklärung der Gleitreibung zwischen rein metallischen Oberflächen durch die Ausbildung von Schweißbrücken. Der Reibkontakt kann in einigen Bereichen dazu führen, daß es zu Wechselwirkungen zwischen den Atomen beider Reibpartner kommt, während weite Bereiche jedoch zu weit für interatomare Wechselwirkungen entfernt sind. Solche Kontaktbereiche lassen sich als Brücken bezeichnen, die in Summe die reale Kontaktfläche repräsentieren. Es handelt sich demnach um ein Modell, welches auf der Adhäsion basiert und die plastische Verformung von Rauigkeitsspitzen für die Energieverluste verantwortlich macht. Ist nun zum Scheren einer Schweißbrücke die Tangentialspannung τ_c nötig, kann die maximale Haftreibung mittel Gleichung (3.3) ermittelt werden (mit σ_0 als Eindruckhärte):

$$F_S = F_N * \frac{\tau_c}{\sigma_0} \quad (3.3)$$

Diese kann auch als das Produkt von Scherspannung und Kontaktfläche definiert werden (Gleichung (3.4)):

$$F_S \approx \tau_C * (A_{Druck} + A_{Zug}) \quad (3.4)$$

Die Wechselwirkungen der Oberflächenrauheiten können ebenso als Spitzen und Täler beschrieben werden. Die Spitzen drücken sich in die Täler, wobei eine harmonischere Struktur entsteht. Sie weisen hohe mechanische Spannungen auf, die bei Reibung zu Oberflächenschädigungen (Verschleiß) führt. Das Modell ist jedoch idealisiert, indem es profilierte Oberflächen berücksichtigt, die kugelförmige Gestalt aufweisen und sich plastisch verformen. [2], [4]

Auch das **Greenwood-Williamson Modell** nutzt die Beschreibung der Kontaktoberflächen zweier Körper als Spitzen und Täler, wobei elastische und plastische Kontaktdeformation modelliert werden kann. Alle Rauigkeitsspitzen, auch als Asperitkontakte bezeichnet, weisen den gleichen Krümmungsradius auf, während die Höhe dieser Spitzen sich jedoch stochastisch um ein mittleres Niveau verteilt (stochastisches Oberflächenmodell). Die reale Kontaktfläche (Gesamtheit aller Asperitkontakte) nimmt mit der Steigerung der Anzahl von Mikrokontakten zu und ist proportional zur Normalkraft, während die Fläche der einzelnen Kontakte annähernd konstant bleibt. Zu betonen ist, daß die Unterscheidung in elastische und plastische Kontaktsituation bestimmt wird durch die Härte des Materials und nicht von der angelegten Normalkraft. [4]

Diese allgemeinen Beschreibungsansätze erlauben die Charakterisierung von Haft- und Gleitreibung, zudem stellen sie Erklärungsversuche für die Reib- und auch Verschleißmechanismen der Festkörperreibung dar. Die Besonderheiten der Reibpaarungen trockenlaufender Radbremsen sollen im folgenden vorgestellt werden.

Im Rahmen seiner Untersuchungen hat Musiol [5] keine in-situ Betrachtungen der Reibvorgänge vorgenommen, wohl aber entscheidende

und fundamentale Erkenntnisse in Bezug auf die Reibmechanismen an trockenlaufenden Reibbremsen gewonnen (Abb. 3.1).



Abb. 3.1: REM-Aufnahme eines Belagquerschnitts – Grundwerkstoff, Reibschicht, Reibfilm, [5]

Er hat wichtige Aussagen zu den Veränderungen in der Reibschicht unter Bezug auf die Reibeigenschaften herausgestellt, in dem er grundlegende Untersuchungen der sich einstellenden Reibfilme und –schichten mittels physikalischer und chemischer Analysen (REM / EDX) durchführte. Der Reibfilm wird als Reaktionsschicht beschrieben, die mechanisch nicht sehr stabil ist. Als ursächlich für die Ausprägung dieses Films werden während des Reibprozesses entstehende Oxidschichten (z.B. Eisenoxide wie Fe_2O_3 oder Fe_3O_4) ausgemacht. Das Eisen stammt dabei vorrangig aus dem Reibring, jedoch können auch Eisenbestandteile aus der Reibmatrix identifiziert werden. Musiol erkennt, daß der Reibfilm die Reibmatrix vor thermischer und mechanischer Belastung schützt. Dies natürlich nur in begrenztem Maße, da eine mechanische und thermische Überbelastung möglich ist. Die Reibschicht bewirkt einen konstanten Reibwert sowie einen geringeren Verschleiß, der abrasive Anteil wird reduziert.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Stahl-Scheiben und organische Beläge für Trommel- und Scheibenbremssysteme sowie vereinfachte Prüfkonzepte (lineare Reibbewegung) verwendet, Betrachtungen von Pkw-Radbremsten unterblieben jedoch.

Die Analysen bezogen sich auf die Betrachtung der zeitlichen Verläufe des sich einstellenden Reibwertes, der Durchführung von REM / EDX – Analysen und dem Aufzeigen von Korrelationen zwischen der gebildeten Reibschicht und dem Reibwertverlauf sowie der Anwendung der Methode auf das Phänomen Bremsenquietschen. Es wurden sowohl Dauer- als auch Verzögerungsbremssungen berücksichtigt.

Es zeigte sich, daß die Verschleißrate während des Einlaufvorgangs (engl.: bedding) am größten ausfällt, da die Reibschicht noch nicht ausgeprägt ist. Der Reibwert steigt mit dem Bedding, die Verschleißrate sinkt hingegen. Auf beiden Reibpartnern ist die Reibschicht nachweisbar, der Belag übernimmt jedoch eine dominante Rolle. Dabei wird besonders auf die Bedeutung der Oberflächentopographie der Reibpartner hingewiesen. Da sich diese kontinuierlich ändert, können in-situ Betrachtungen als ideales Werkzeug der Beobachtung der dynamischen Oberflächenveränderungen angesehen werden. Auch die Tatsache, daß sich heterogene Kontaktflächen einstellen, so daß reale Kontaktdrücke signifikant größer als die Nominellen (bis zu Faktor 60) ausfallen, ist eine wichtige Motivation für in-situ Betrachtungen, mit deren Hilfe auch Kontaktflächenverhältnisse abgeschätzt werden können.

Musiol erkannte, daß globale Reibwerte nur bedingt aussagekräftig sind. Der ständige Wechsel zwischen den in Kontakt befindlichen Bereichen kann einen konstanten globalen Reibwert bewirken, während der Lokale sich dynamisch ändert. Ebenso erfolgten Betrachtungen zum thermischen Verhalten. Große thermische Beanspruchungen können zu einer Überlastung einzelner Kreisringsegmente führen, so daß es zu einem Verlagern der tragenden Bereiche (Wanderung in radialer Richtung) kommen kann. Es wurde festgestellt (Abb. 3.2), daß sich ab ca. 200°C periodische Temperaturschwingungen einstellen (Dauerbremsversuche von 50 min. Dauer).

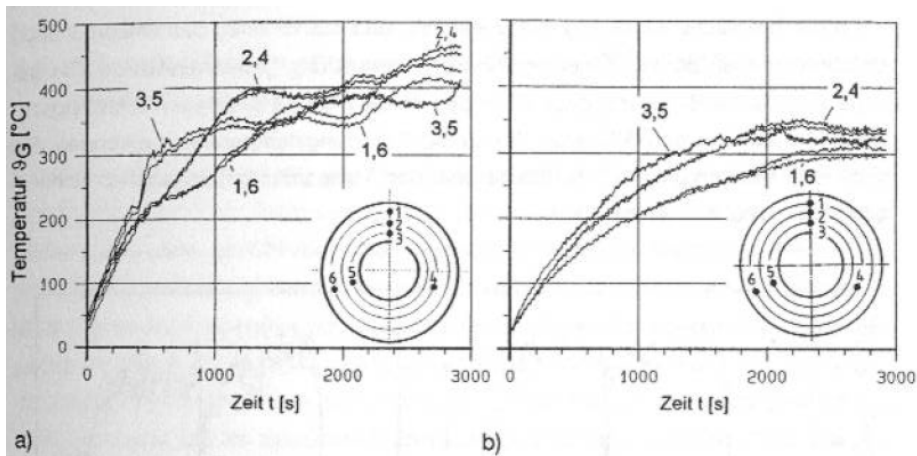


Abb. 3.2: Reibflächentemperatur für verschiedene Stellen über dem Reibring für verschiedene Reibgeschwindigkeiten (a = 13 m/s; b = 8 m/s), [5]

Die thermische Überbelastung führt zum Abtragen der Reibschicht (die Reibschubspannung ist dabei größer als die Trennfestigkeit der Reibschicht). Der Abtrag erfolgt in Form von Verschleißpartikeln, die einen Krater hinterlassen, was mit in-situ Betrachtungen direkt nachgewiesen werden könnte. Dadurch ist klar, daß die überlasteten Bereiche (auf dem Belag) einen geringeren Eisenanteil aufweisen als die ungeschädigten Bereiche, da die Reibschicht das Eisen des Reibrings in Oxidform aufweist. Es wurde nachgewiesen, daß die thermische Belastung für die Kreisringsegmente phasenverschoben und periodisch erfolgt, ein Wandern in radialer Richtung ist möglich. Dabei erkennt der Autor, daß die thermischen Prozesse sehr dynamisch sind, die genutzten Thermoelemente erweisen sich als zu träge. Der Einfluß von Oberflächenrauheiten, insbesondere der Scheibe, ist zudem Grund für die Variation der Rauheiten beider Reibpartner, was zu geänderten Reibwertverläufen führen kann.

Die gewonnenen Erkenntnisse bzw. entwickelten Methoden wurden anschließend auf das Phänomen Bremsenquietschen übertragen bzw. angewendet. Bei grünen (ungelaufenen) Belägen stellt sich kein Geräuscheignis ein. Einher geht dieses Ergebnis mit einem Grenzwert für den Reibwert μ , unterhalb dessen es kein Quietschen gibt. Für große Reibwerte wird die Reibschicht als verantwortlich angesehen. Hier werden

die Eisenpartikel (als Eintrag in die Reibschicht aus der Reibmatrix in Form sogenannter Reibkraftverstärker, nicht aus dem Reibring stammend!) als ursächlich für die Geräuschphänomene erachtet. Als Mechanismus nennt Musiol speziell die Stick-Slip Theorie. Hierbei spricht er jedoch nicht Phänomene im Makrobereich, sondern vielmehr im Mikrobereich, an. Er beschreibt die Eisenpartikel als eingespannte Stifte, die sich verspannen und spontan entspannen (freigesetzte Energie bedeutet eine Systeminstabilität, die größer als das Dämpfungsvermögen ausfällt, so daß sich eine Geräuschgenerierung einstellt). Eine in-situ Bestätigung dieser Hypothese bzw. ihre Validierung bleibt jedoch aus. Musiol greift Professor Ostermeyer (TU Braunschweig) vorweg, in dem er sagt, daß die Eisenpartikel („Stäbchen“) sich im gleichen Rhythmus ver- und entspannen und sich damit gewissermaßen synchronisieren.

In [6] zielt Poeste auf Untersuchungen zu tribochemischen Reaktionen zwischen den Reibpartnern Grauguß und Stahl sowie organischen Reibbelägen. Er beschreibt dabei tribochemische Oxidschichten, die den adhäsiven Verschleiß verringern, wie dies bereits Musiol [5] vor ihm tat. Jedoch können auch gelöste Oxidschichten abrasiv wirken und somit die Verschleißrate erhöhen (als Verschleißmechanismus der Tribooxidation). Die ermittelten Oxidschichten (metallische Oxide) bilden sich meist erst ab Temperaturen oberhalb von 200°C aus. Zudem wurde ein Eisenübertrag von der Bremsscheibe auf den Belag erkannt (Abb. 13.1). Dominant sind dabei Magnetit (Fe_3O_4) sowie in schwächerer Konzentration Hämatit (Fe_2O_3), aber auch Kupferoxide werden ermittelt (Tenorit (CuO) und Paramelakonit ($\text{Cu}_2^{1+}\text{Cu}_2^{2+}\text{O}_3$)). Die Eisenoxide wirken, aufgrund ihrer großen Härte, im Falle eines HerauslöSENS aus dem Reibfilm abrasiv und erhöhen die Verschleißrate.

Der Gruppe um Jacobson gelang es als erste, Reibuntersuchungen in-situ vorzunehmen. Die Untersuchungen erfolgten an vereinfachten Prüfständen (zur Realisierung der in-situ Versuche), sowie an konventionellen Bremsenschwungmassenprüfständen. Ergänzend erfolgten physikalisch- /

chemische Oberflächenanalysen (Rauigkeitsmessungen, SEM, EDX). Zudem wurden geräuschlich auffällige Reibpaarungen betrachtet, um Erklärungen von Geräuschereignissen mit Hilfe der Ausprägung unterschiedlicher Belagoberflächentopographien zu formulieren.

Die (dynamische) Ausprägung von Primär- und Sekundärplateaus sowie deren Entstehung, Bestehen und Zerfall können erstmalig aufgezeigt werden (Abb. 3.3). Dabei zeigt sich gut, wie sich die Sekundärpatches an den Primärplateaus anlagern und beide gemeinsam die realen Kontaktbereiche darstellen. Die Reibversuche erfolgten als pin-on-disc Setup, wobei organisches Reibmaterial gegen eine Glasscheibe gepreßt wurde.

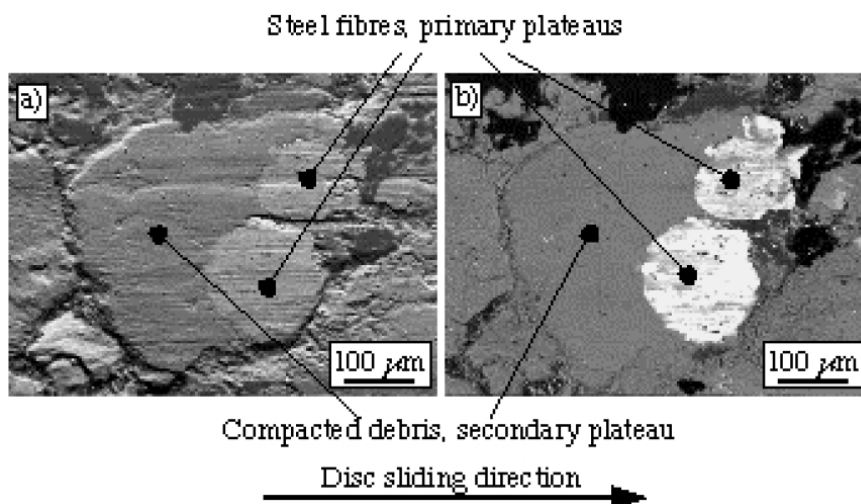


Abb. 3.3: ausgeprägte Kontaktplateaus auf der Bremsbelagoberfläche (REM-Aufnahmen), a) topographischer Kontrast, b) zusammengesetzter Kontrast), [7]

Es kam Videotechnik sowie Mikroskopie zum Einsatz. Verschiedene Versuche in Bezug auf das Einlaufverhalten (Bedding, Run In), Normalkraftvariationen sowie den Einfluß von Nässe (hier Ethanol) wurden realisiert. Für letztere werden keine quantitativen Aussagen vorgenommen. Die Erkenntnis, daß der Zusatz von Ethanol zu einer deutlichen Zunahme der Verschleißpartikelagglomeration führt, läßt darauf schließen, daß nur mit geringen Mengen Flüssigkeit gearbeitet wurde. Versuche der vorliegenden Arbeit werden zeigen, daß für größere Flüssigkeitsmengen ein

rascher Abbau der Reibschicht sowie ein „Wegspülen“ der agglomerierten Partikel zu erkennen ist (Kapitel 7.5.2).

Auch wenn die Glasscheibe deutliche Verschleißspuren aufweist, kann erkannt werden, daß die Entstehung und auch der Zerfall der Plateaus dynamische Vorgänge sind.

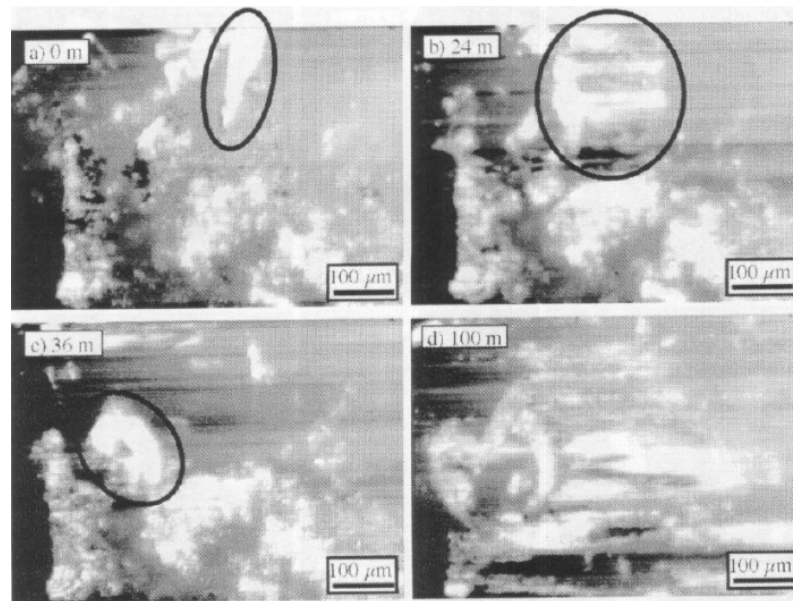


Abb. 3.4: Ausschnitt einer Belagoberfläche während des Reibprozesses (Einlauf-Vorgang), [8]

Zu erkennen sind in Abb. 3.4 Aufnahmen der Reibzone zu unterschiedlichen Zeitpunkten (verschiedenen zurückgelegten Wegen: 0 m, 24 m, 36 m, 100 m), um die Dynamik zu verdeutlichen, wobei die sehr hellen, markierten Bereiche zunächst ausschließlich die Primärpatches, im weiteren (Bilder b, c und d) Primär- und Sekundärpatches repräsentieren. Lediglich diese Plateaus übernehmen die Kraftübertragung, die sogenannten Lowlands sind daran nicht beteiligt. Es stellen sich somit höhere reale Kontaktdrücke als die Nominellen ein, was bereits Musiol [5] erkannte (wenngleich nicht in-situ). Der Hauptverschleiß wird durch die Partikel begründet, die durch die Kanäle bzw. Labyrinth fließen. Zu große Partikel verschmelzen zu Sekundärplateaus, Primärplateaus bilden sich an verschleißfesteren Bereichen (z.B. Stahl-Fasern) aus.

Damit konnte erstmals das dynamische Verhalten der Kontaktflächen, die real deutlich geringer ausfallen als die nominell angenommenen (zwischen 10 und 30% der nominellen Kontaktfläche), verfolgt werden. Tatsächlich sind es lediglich vereinzelte Spots auf den Plateaus selbst, die die Kraftübertragung übernehmen (Abb. 3.5). Aufgrund der Dynamik der Prozesse zeigt sich, daß sich diese Spots ständig verändern (Verschleißprozeß).

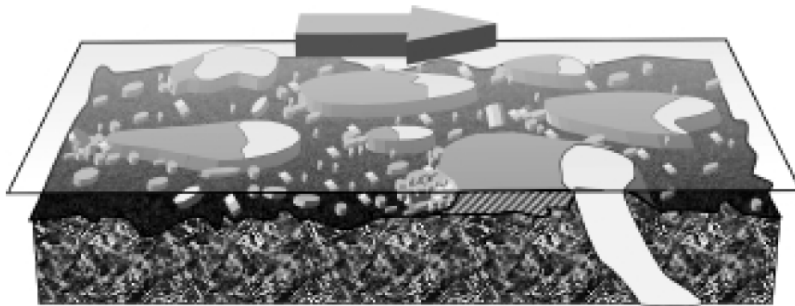


Abb. 3.5: schematische Darstellung der Kontaktsituation für einen organischen Bremsbelag und eine Bremsscheibe, [7]

Neben den Visualisierungsuntersuchungen wurden zudem Analysen am Dynamometer durchgeführt, um für die klassische Reibpaarung Grauguß-Scheibe – organischer Reibbelag das Reib- und Geräuschverhalten zu bestimmen. Hierunter fällt auch der Einfluß von Feuchte auf den Reibwert sowie die mögliche Reibwert-Hysterese von Belägen, auch und gerade vor dem Hintergrund der Randbedingungen für auftretende Geräusche. Diese Aussagen sind jedoch keinesfalls allgemeingültig, wie auch die Autoren selbst erwähnen. Sie gelten vielmehr für die untersuchte Reibpaarung und auch nur für das untersuchte Bremssystem – gerade die Fahrwerksperipherie hat einen großen Einfluß auf das Stabilitäts- und Abstrahlverhalten der Radbremse. [7][8][9]

Einschränkend kann man festhalten, daß die vorgestellten Erkenntnisse der in-situ Untersuchungen unter sehr vereinfachten Randbedingungen gewonnen wurden. Die Problematik der Übertragbarkeit auf konventionelle Reibpaarungen (Grauguß-Scheibe – organischer Reibbelag)

wird kaum beleuchtet und soll in Zukunft im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen stehen.

Obwohl die Untersuchungen von Sherif [10] vor dem Hintergrund des Komfortverhaltens, konkret dem Bremsenquietschen, erfolgten, stellen sie doch hinsichtlich der Wahl der Reibpartner (organischer Reibbelag, Reibscheibe aus Plexiglas) eine interessante Arbeit dar. Auch wenn es der Ansatz der Reibpartnerwahl zugelassen hätte, so unternahm Sherif keine in-situ Betrachtungen zu den Vorgängen in der Reibzone, sondern untersuchte das Stabilitätsverhalten und das sich einstellende Schwingungs- und Geräuschverhalten hinsichtlich der Rauheiten des Reibrings, welche durch den verglasten Reibbelag nachhaltig beeinflusst wurden. Obgleich keine Angaben zur Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Graugußscheiben gemacht wurden (das sich einstellende Geräusch bei 9,2 kHz wird in keinen Bezug zum Abstrahlverhalten einer vergleichbaren Graugußscheibe gesetzt) und auch der Aktuierungsmechanismus nicht einer realen Bremse entsprach (pin-on-disc Modell), so zeigt dieser Ansatz dennoch, daß Grundsatzuntersuchungen zu Reibmechanismen (auch wenn hierbei eher das sich einstellende instabile Schwingungsverhalten im Fokus der Untersuchungen stand) auch mit nicht-konventionellen Reibpartnern vorgenommen werden.

Das tribologische Verhalten von SiC-faserverstärktem Borosilikatglas wird in Quelle [11] untersucht. Dabei wird eine Ring-auf-Platte Geometrie genutzt, bei der ein Borosilikatglas-Ring oszillierend gegen eine Stahl-Platte reibt und somit einen ungeschmierten Reibkontakt darstellt. Die Messungen erfolgen für ein weites Temperaturfeld (Raumtemperatur bis 500°C), wobei es sich um die Umgebungstemperatur handelt. Eine Erfassung der Temperatur in der Reibzone selbst erfolgte nicht. Durch die Faserverstärkung sind die optischen Eigenschaften des Glases zwar stark beeinträchtigt, eine Transparenz ist de facto nicht mehr vorhanden, das prinzipielle Reibverhalten und die beschriebenen Reibmechanismen sind jedoch von hohem Interesse, da Borosilikatglas für die in-situ

Betrachtungen ein geeigneter Reibwerkstoff sein kann. Der Autor zum Gahr stellt fest, daß der Verschleiß in der initialen Reibphase sehr groß ausfällt, sich anschließend deutlich verringert. Es wird bestätigt, daß sich Oberflächenschichten auf Glas und Stahl (SiO_x sowie Fe_2O_3) ausbilden, die den schützenden dritten Reibkörper bilden. Der vorliegende Materialtransfer wird jedoch nicht in Form von Schichtdicken und konkreten chemischen Zusammensetzungen charakterisiert. Auch konnten beim Übergang von Haften zu Gleiten stick-slip Effekte erkannt werden, die (Gleit-)Reibwerte selbst nehmen Werte zwischen 0,4 und 1 an. Bezüglich der auftretenden Verschleißmechanismen wird festgestellt, daß zunächst Mikrorisse auftreten. Ab ca. 150°C (Anm.: Poeste nennt hierfür bei seinen Untersuchungen 200°C) folgen tribochemische Reaktionen, als deren Folge sich die schützenden Reibschichten (ab ca. 300°C) ausprägen und der Verschleiß verringert wird. Obwohl gewisse Parameter (wie Temperaturen, Reibwerte, Verschleißraten) nicht direkt vergleichbar sind, lassen die festgestellten Reibmechanismen Parallelen erkennen und zeigen, daß Borosilikatglas als Partner in technischen Reibpaarungen interessant ist. Seine Tauglichkeit für die angestrebten in-situ Untersuchungen hingegen ist noch zu prüfen.

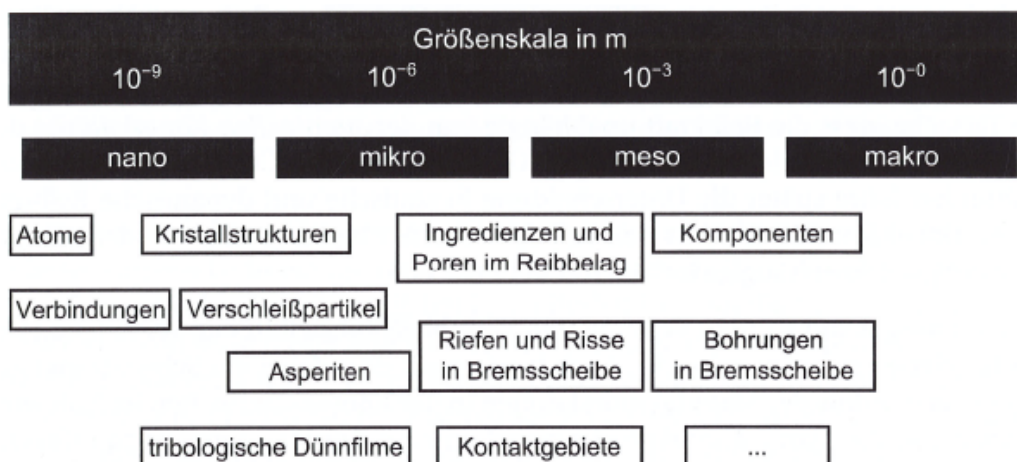


Abb. 3.6: Einordnung der Größenskalen beim Reibprozess, nach [12]

Wichtige Arbeiten insbesondere zur Modellierung von Reibmechanismen wurden durch und unter Professor Ostermeyer (TU Braunschweig) vorgenommen. Es wird betont, daß es sich dabei um Multiskalenprobleme handelt (Abb. 3.6). Diese Einschätzung verdeutlicht besonders gut, daß allein rein globale und makroskopische Untersuchungen zum vollständigen Verständnis der Vorgänge in der Reibzone nicht zielführend sind.

Am IDS in Braunschweig (Institut für Dynamik und Schwingungen) wurde ein dynamisches Reibgesetz zur Beschreibung von zeitvarianten Reibmodellen entwickelt. Die Basis stellt die Plateau-Theorie von Jacobson dar. Dabei wird SiO₂ (Quartz) als Ausgangspunkt der Ausbildung von Sekundärplateaus angesehen. Hierbei erfolgt eine Beschreibung der Reibzone unter Bezug auf den Aufbau (Abb. 3.7, links), das Verweilen und den Abbau von Plateaus (Kontaktzonen). Daraus leitet sich ein Kreislauf für die Ausprägung von Reibung und Verschleiß (als direkte Folge von abgetragenen Partikeln) ab, um die Reibleistung als Funktion des Patchwachstums und –abbaus zu beschreiben (Abb. 3.7, rechts).

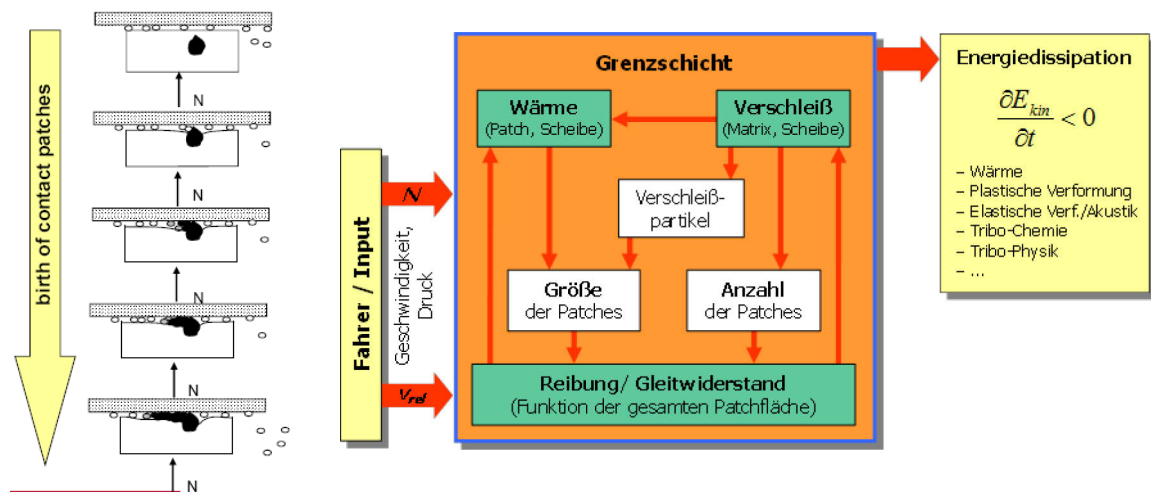


Abb. 3.7: Geburtsmechanismus eines Patches / Plateaus (links), aus [15], Darstellung der Wechselwirkungen innerhalb der Reibzone (rechts), nach [14]

Ausgangspunkt ist eine Bilanzgleichung (Gleichung (3.5)) zur Bestimmung des dynamischen Reibkoeffizienten:

$$\dot{\mu} = f_1 - f_2 \quad (3.5)$$

Dabei stellt sich f_1 als Funktion des Patchwachstumsverhaltens dar. Sie definiert sich mittels der Gleichung (3.6):

$$f_1 = k_5 * T_P \quad (3.6)$$

Das Patchwachstum ist somit lediglich durch die auf den Patches wirkende mittlere Temperatur T_P sowie der Wachstumsrate k_5 bestimmt.

Das Patchzerfallverhalten auf der anderen Seite ist durch die Funktion f_2 definiert und durch Gleichung (3.7) beschrieben:

$$f_2 = k_2 * F_R + k_3 * \frac{A_P}{A_{nom}} \quad (3.7)$$

Diese setzt sich aus der Reibkraft F_R sowie dem Verhältnis aus den Patchflächen (A_P) und der nominellen Fläche (A_{nom}) zusammen. Zudem wird der patchzerstörende Einfluß der Reibleistung P_R , die sich aus dem Produkt der Flächenpressung p_F , der Patchflächen A_P , dem Reibwert μ sowie der Relativgeschwindigkeit v_r ergibt (Gleichung (3.8)), mit dem Korrelationsfaktor k_2 berücksichtigt.

$$P_R = p_F * A_P * \mu * v_r \quad (3.8)$$

Auch die von P_R unabhängigen zerstörenden Einflüsse fließen mit dem Koeffizienten k_3 in die Berechnung ein. Berücksichtigt wird in ihm u.a. die mit Patchgröße und –alter steigende Wahrscheinlichkeit des Patchzerfalls.

Zur Abbildung der Reibschicht bzw. Reibfläche werden zelluläre Automaten genutzt. Sie stellen lokale Diskretisierungen in Zellen dar, denen physikalische, chemische und thermodynamische Eigenschaften zugewiesen werden. Diese Zellen interagieren über Bilanzgleichungen miteinander für diskrete Zeitschritte und ergeben in Summe nach einer definierten Schrittweite ein globales Systemverhalten.

Die besondere Herausforderung besteht dabei zum einen in der Hinterlegung der jeweiligen Berechnungsgrundlagen (-gesetze), sowie in der korrekten Parametrierung der Zellen (z.B. Oberflächenhärte und -steifigkeit). Die Modelle zeigen Ergebnisse der Dynamik des Patch- und Partikelverhaltens (a), der Wärmeverteilung (b), der elastischen

Deformationen (c) sowie des Höhenprofils (d), wie sie beispielhaft in Abb. 3.8 dargestellt sind.

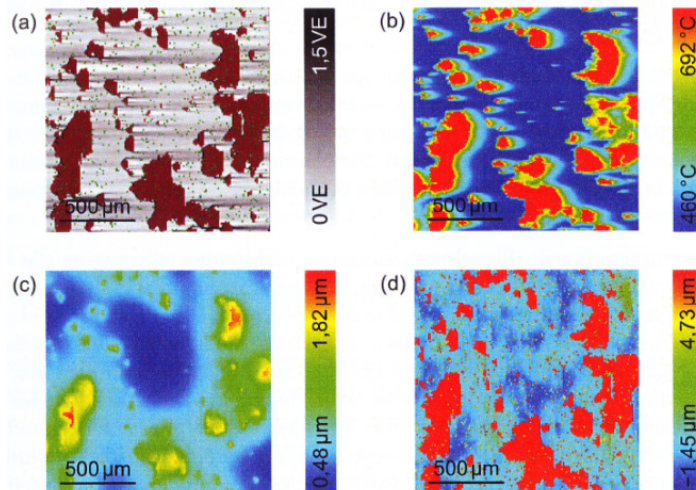


Abb. 3.8: Ausgabegrößen der Simulationen mittels Zellulärer Automaten und unter Nutzung dynamischer Reibgesetze, [12]

Eine experimentelle Validierung des Patchverhaltens wird dabei jedoch erst nach erfolgter experimenteller Prüfung vorgenommen, eine Betrachtung während der Reibprozesse bleibt indes aus.

Auf Basis der Modelle der Zellulären Automaten werden im Wesentlichen zwei Aspekte beschrieben: Leistungsfähigkeit (engl.: performance) sowie Komfort. Im Bereich der Performance werden zunächst die Resultate aus einer Standardprüfprozedur, der sogenannten AK Master-Prüfung, nachgebildet. Diese stellt einen weltweit akzeptierten Industriestandard dar, um das tribologische Verhalten von Reibpaarungen zu charakterisieren. Anschließend ist es möglich, mit Hilfe der Modelle die Ergebnisse solcher Prüfungen prädiktiv zu erhalten. Voraussetzung ist dabei immer eine korrekte und umfassende Parametrierung. Der Komfortaspekt berücksichtigt reibinduzierte Schwingungen im hochfrequenten Bereich, das Bremsenquietschen. Hierbei wird eine Synchronisierung der Patches untereinander erkannt, bei der es zu einer Kopplung (hinsichtlich Frequenz und Phase) in Form tangentialer Schwingungen kommt. Die Partikel

verhalten sich dann wie ein Ein-Freiheitsgrad-System (engl.: Single Degree of Freedom = SDOF). Somit kommt es zu einem Ansteigen der Schwingungsenergie (integral betrachtet für den Bereich der Kontaktzone). Übersteigt nun diese betragsmäßig das Dämpfungsvermögen der Bremse (im Wesentlichen des Belages), kann eine Geräuschabstrahlung erfolgen. Als Kriterium kann demnach die Oberflächentopographie, speziell die des Reibbelages, dienen. Die Gruppe um Ostermeyer hat erkannt, daß ein leiser Belag viele kleine Kontaktflächen aufweist, ein Lauter indes wenige Große. Diese Charakterisierung erfolgt in jedem Fall aber immer im Anschluß an die Bremsung /-en, in-situ Betrachtungen erfolgen nicht. Aufgrund der hohen Patchdynamik können sich während der Bremsung andere Verhaltensmodi zeigen, welche nicht erkannt werden. [12]..[15]

Neben der Betrachtung des Reibverhaltens ist auch das thermische bzw. thermomechanische Verhalten von trockenlaufenden Reibpaarungen bedeutsam. Insbesondere die Thematik der Thermoelastischen Instabilitäten (TEI) ist von hohem Interesse, da sie das Reib- und Verschleißverhalten nachhaltig beeinflussen. Sie bewirken eine thermomechanische Beanspruchung durch das Auftreten von zyklischen Zug- und Druckspannungen teils mit plastischer Dehnung. Es kommt zudem zu Phasenumwandlungen, so daß Risse der Scheibe die Folge sind. Auch ist es möglich, daß der Reibbelag geschädigt wird (Risse, Delaminierung). Besonders die Gruppe um Professor Severin (TU Berlin) hat umfangreiche und wichtige Beiträge bezüglich der periodischen Temperaturschwankungen auf dem Reibring, dem sogenannten Hot Banding bzw. den Hot Bands, geleistet. Musiol hat erste Arbeiten zu diesem Thema durchgeführt, gefolgt u.a. von Dörsch und Kleinlein. [16]..[19]

Verwendung fand ein Industriebremssystem, konkret Kupplungsreibungspaare mit einer rotierenden Scheibe sowie zwei statischen Reibringen, die axial gegen die sich drehende Scheibe gepreßt werden. Neben der klassischen Sensorik von Reibprüfständen wurde eine Thermografiekamera genutzt, um das thermische Verhalten der Reibzone

durch ein dünnes Metallblech hindurch zu bestimmen. Diese Art der in-situ Betrachtung ist jedoch nicht in der Lage, die Reibzone direkt zu betrachten bzw. die dynamischen Vorgänge visuell aufzulösen. Kleinlein betont in seinen Ausführungen, daß das lokale Geschehen in der Reibzone für den Anwendungsingenieur meist weniger interessant ist, jedoch bestimmt gerade dieses das globale Verhalten. Für die Reibstoffentwicklung indes sind die lokalen Mechanismen entscheidend, was Untersuchungen gerade vor dem Hintergrund der lokalaufgelösten Mechanismen so wichtig macht. Ferner wird darauf hingewiesen, daß globale Reibeigenschaften (Reibarbeit, Reibleistung, Temperatur) und lokale Mechanismen gleichzeitig und simultan wirken. Es genügt daher nicht, nur auf einer Größenskala das Reibsystem zu betrachten, weshalb auch die vorliegende Arbeit globale und lokale Untersuchungen gegenüberstellt. Die Autoren verstehen dabei unter globalen Untersuchungen die Betrachtung der vollständigen Reibzone, während lokale Analysen lediglich einen Reibzonenausschnitt berücksichtigen, obgleich dieser in seinen Abmessungen nicht explizit definiert ist.

Für das globale Verhalten wird festgestellt, daß die Beurteilung der globalen Reibeigenschaften über den Reibwert μ , die Verschleißkennzahl, die Scheibenrauheit und die Reibschwingungskennzahl erfolgt. Daraus leitet sich auch die Berechnung der Reibarbeit und -leistung ab. Das lokale Verhalten indes zeigt, daß die Reibintensität nicht gleichverteilt ist. Es erfolgt eine Ausprägung konzentrischer Ringe unterschiedlicher Temperatur, die im kontinuierlichen Reibprozeß periodisch ihre Lage ändern. Das thermische Verhalten kann dabei in Abhängigkeit der Belastung verschiedene Zustände aufweisen, die sich auch im Momentenverlauf zeigen. Demnach spricht man auch von thermomechanischen Verhalten.

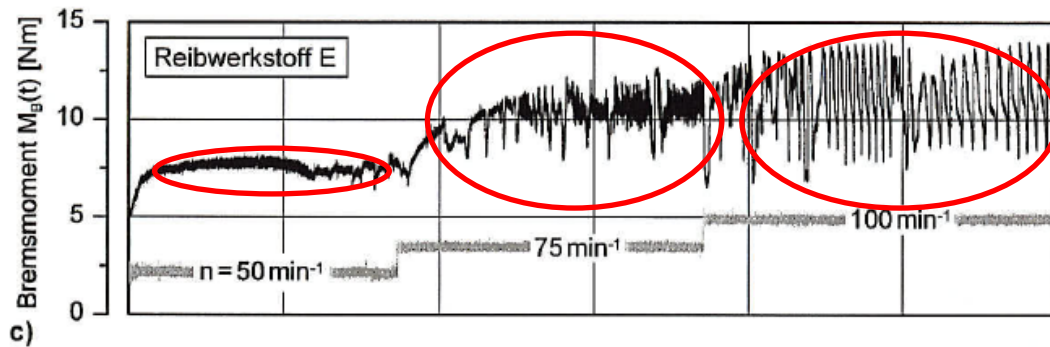


Abb. 3.9: stationäre, unharmonische und harmonische Momentenverläufe für verschiedene Drehzahlen, nach [18]

Demnach können sich stationäre Zustände, unharmonische Schwingungen und harmonische Schwingungen (in Abb. 3.9 von links nach rechts) einstellen. Für die auffälligen Schwingungen ist jedoch eine bestimmte Mindestbelastung erforderlich, so daß ein bestimmtes Reibflächentemperaturniveau erreicht wird. Bereits Dörsch hat gezeigt, daß die schwingenden Reibmomente auf den Verschiebungen der Orte maximaler thermischer Belastung basieren. Kleinlein zeigte dann, daß das Moment am größten ist, wenn am Außenring die thermische Belastung am größten ist. Das Moment ist am kleinsten, wenn die Temperatur am Innenring maximal ist. Die ständige Verlagerung der Temperaturen und daraus folgend der Momente bedeutet gleichzeitig einen ständigen Wechsel des wirksamen mittleren Reibradius. Berechnet man nun den Reibwert μ mit einem konstanten mittleren Reibradius r_m , zeigt dieser die Schwingungen des Momentes. Tatsächlich jedoch verlagert sich r_m mit der Momentenverlagerung, μ wäre demnach konstant. Es konnte gezeigt werden, daß jeder Reibwerkstoff eine gesetzmäßige Beziehung zwischen den Temperaturen der einzelnen Reibringe zeigt. Diese ist als werkstoffspezifisch (werkstoffimmanente Eigenschaft) anzusehen. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß es zu zeitlich verlagerten Temperaturänderungen oder gar um vollständig versetzte (um 180°) Signale kommen kann. Dabei fallen die Temperaturamplituden umso kleiner aus, je schneller der Belastungswechsel erfolgt (denn je kürzer ein

Reibring belastet wird, umso weniger Zeit bleibt ihm, um einen deutlichen Wärmeeintrag zu erfahren). Kleinlein stellt fest, daß die stärkste Einflußgröße die Reibflächentemperatur als Funktion der thermischen Belastung ist.

Neben der experimentellen Betrachtung haben u.a. Bode [25] und Graf [20] Arbeiten zur Modellierung der Hot Bands vorgestellt. Diese sind meist nicht stationär, sondern oszillieren periodisch in radialer Richtung, jedoch langsam. Vorgestellt wird eine Modellfamilie zur Beschreibung des Phänomens der Hot Bands unter Nutzung der Elastizitäten, thermischen Ausdehnung und Leitung sowie dem Verschleiß. Da die Hot Bands eine entscheidende Rolle bei der Lastübertragung tragen, verlagert sich auch der mittlere Reibradius. Die Agglomeration von Verschleißpartikeln bedeutet eine Verlagerung der Lastübertragung, in dem sich das tragende Element aufheizt, sich ausdehnt und höhere Lasten überträgt. Die Temperatur und der Verschleiß steigen. Somit verlagern sich die Abriebpartikel zu benachbarten Bereichen, agglomerieren und übernehmen dort die Lastübertragung (= Verlagerung des Reibrings). Neben einer Modellbeschreibung wird als Ergebnis u.a. ausgeführt, daß die Verlagerung der Reibringe bereits innerhalb von 40 s erfolgen kann, obwohl eine vollständige Verlagerung mehrere Minuten dauert. Detaillierte Ausführungen zum dynamischen Verhalten werden indes nicht gemacht. Neben der Beschreibung sogenannter Hot Bands sind auch die sich aus ihnen ergebenden Hot Spots ein wichtiges Phänomen, welches separat in der Vergangenheit untersucht wurde. [21]..[23]

Die als heiße Flecken auftretenden periodischen Temperaturschwankungen gehen einher mit Wellungen der Bremsscheibe. Die Anzahl der Hot Spots variiert und bewegt sich meist zwischen 8 und 20 (u.a. abhängig vom gewählten Scheibendurchmesser), Temperaturunterschiede innerhalb der Flecken können 300°C und mehr ausmachen. Das thermomechanische Verhalten der Reibzone wird dann instabil, wenn kritische Werte für Reibgeschwindigkeit sowie Temperatur erreicht sind. Ein mögliches Modell

wird derart beschrieben, daß die lasttragenden Bereiche, besonders die durch die Welligkeit in die Lastübertragung involvierten, eine erhöhte Flächenpressung und demnach einen erhöhten reibinduzierten Wärmeeintrag erfahren. Durch diese Erwärmung wachsen die Kontaktbereiche stärker an (aufgrund der thermischen Dehnung), was die Flächenpressung weiterhin erhöht. Die gesteigerte thermomechanische Belastung bedeutet jedoch auch einen zunehmenden Verschleiß, so daß diese Bereiche kleiner werden und die Lastübertragung auf benachbarte Bereiche übergeben wird. Ähnlich äußert sich auch Graf. Die Hotspots bilden sich in Umfangsrichtung annähernd gleichmäßig aus, jedoch unterscheidet sich ihre Ausprägung für die beiden Reibringe (in / out board) einer belüfteten Scheibe. Sie können als einzelner (zumeist) mittig verlaufender Ring oder als zwei Hot Spot Ringe (innerer sowie äußerer Reibring) ausgeprägt sein und bilden sich über den Umfang gleichzeitig aus. Einen Initialbereich, von dem die Ausprägung weiterer Hot Spots erfolgt, gibt es nicht, wobei festzuhalten ist, daß sie auf den Wellenbergen des Reibrings entstehen. Diese Wellungen sind eine Folge rein thermischer Belastungen, was erklärt, daß ein bestimmtes Temperaturniveau für das Vorhandensein von TEI erforderlich ist. Die Literatur liefert neben der qualitativen Beschreibung der Hot Spots auf dem Reibring jedoch keine Aussagen zur Dynamik der Verlagerung und Entstehung der Hot Spots in der Reibzone.

Neben den Betrachtungen zum Verhalten des Reibrings geht Bode [12] den Weg der Modellierung des thermischen Verhaltens des Reibbelages. Die Arbeit widmet sich konkret dem Temperaturfeld in Reibbelägen und sieht eine Diskretisierung des Reibmaterials in ein Netz von Zellen vor, so daß letztlich die numerische Lösung von Differentialgleichungen der Wärmeleitung erfolgen kann. Auch wird die (thermische) Wechselwirkung mit der Bremsscheibe berücksichtigt. In Fallstudien werden Stop- und auch Schlepptbremsungen berücksichtigt und das dreidimensionale Temperaturfeld analysiert. Basis der Modellierung ist das bereits bekannte

Modell des IDS (TU Braunschweig), bei dem ein harter Partikel in die weiche Polymermatrix gedrückt wird. Dort zeigen sich eine lokale Temperaturerhöhung sowie eine Agglomeration von Abriebpartikeln, die entgegen der Drehrichtung wächst. Dabei wird die dynamische Verlagerung von Reibringen allerdings nicht berücksichtigt.

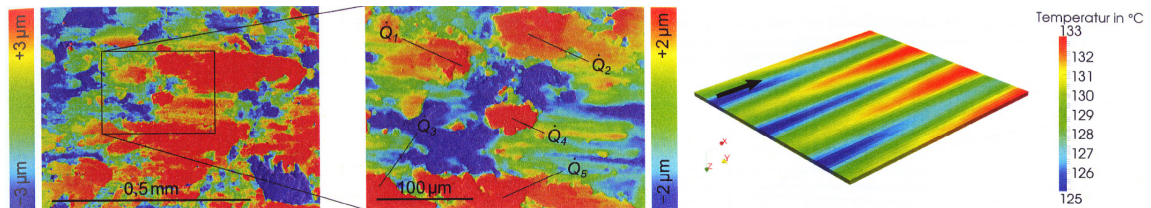


Abb. 3.10: Wärmequellen in Gestalt von Patches auf einem Belagausschnitt (links), Thermische Instabilitäten auf einem Reibring (rechts), nach [12]

Bode erkennt die Patches hier als Wärme(-punkt-)quelle, die durch die komplette Patchfläche repräsentiert werden (Abb. 3.10, links). Betrachtet wird nur ein Belagausschnitt, der jedoch mindestens so groß gewählt sein muß, daß die prozentuale Verteilung und die Größe der einzelnen Ingredienzen korrekt dargestellt werden. Modelliert wird ein Materialeinheitswürfel, so daß stochastische und inhomogene Materialstrukturen des Belages nicht abgebildet werden können. Eine Veränderung der Reibgeschwindigkeit in radialer Richtung wird nicht berücksichtigt, obgleich neben der Kraftaufprägung diese einen Einfluß auf unterschiedliche thermische Belastungen der Reibringe hat. Bemerkenswert ist auch die Modellierung der Eisenbestandteile, die als Fasern (großes Länge- zu Durchmesser Verhältnis) repräsentiert werden. Besonders bei anspruchsvollen Bremsungen kann sich die Struktur in Oberflächennähe jedoch signifikant ändern. Das erarbeitete Modell konnte hinsichtlich der Wärmeleitungseffekte erfolgreich validiert werden, so daß anschließend Anwendungen für Stop- und Schleppbremsungen erfolgen konnten. Obgleich Hot Spots nicht explizit ermittelt wurden, so zeigten sich doch Inhomogenitäten in radialer Richtung des Reibrings (Abb. 3.10, rechts). Die heißen Bereiche decken sich mit denen des Petrolkoks des Belages, so daß dieser für diese Inhomogenitäten verantwortlich gemacht

wird. Damit ist auch eine Basis für die simulative Abbildung von Hot Spots in der Reibzone geschaffen.

3.2 Oberflächenanalysen

Neben den tribologischen Untersuchungsansätzen sind die oberflächenanalytischen Untersuchungen (physikalisch und chemisch) ein wichtiger Bestandteil einer umfassenden Charakterisierung von Reibpaarungen.

Physikalische und chemische Analysen von Reibpaarungen im Allgemeinen und den Reibfilmen sowie –schichten im Speziellen widmet sich die Gruppe um Österle. [26]..[30]

Hierbei werden verschiedene Analysegeräte und –techniken angewendet, um die mikro- und nanoskaligen Effekte zu untersuchen. Zur Durchführung von Oberflächenanalysen nutzt Österle Lichtmikroskopie (LM), Rasterelektronenmikroskopie (engl.: Scanning Electron Microscope (SEM)) mit Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (engl.: energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX)) zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Oberflächenschichten sowie ein FIB (engl.: Focused Ion Beam), welches tribologisch beanspruchte Bereiche in hellem Kontrast zeigt. Ferner erfolgen Querschnittsanalysen unter Nutzung eines FIB (Erfassung der Schichtstrukturen und deformierten Zonen), SEM / EDX (Analyse von dicken Strukturen größer 1 μm) sowie der Transmissionselektronenmikroskopie (engl.: Transmission Electron Microscopy (TEM)) / EDX (zur Betrachtung nanokristalliner Strukturen und dünnen Filmen). Zudem findet ein FIB zur Probenpräparation für die TEM-Analysen Verwendung.

Österle erkennt deutlich ausgeprägte Primär- und Sekundärplateaus, welche von nanokristallinen Reibfilmen mit einer Dicke von ca. 50..100 nm bedeckt sind (Abb. 3.11).

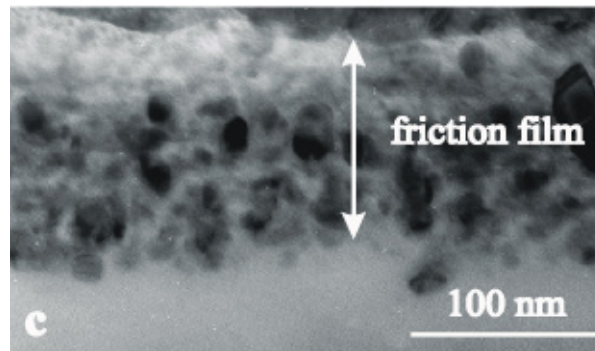


Abb. 3.11: TEM-Aufnahme eines Reibfilms auf einem Reibbelag, aus [26]

Sie sind auf Scheibe und Belag zu erkennen, weisen dabei keine homogene Dicke auf, sondern gleichen die topographischen Charakteristiken aus. Die bisherigen Arbeiten konzentrieren sich auf organische Reibbeläge, bei denen die typischen nachgewiesenen Metalle mit Eisen, Kupfer, Mangan und Zink angegeben werden.

Die Zusammensetzung der Reibfilme fällt für Belag und Scheibe unterschiedlich aus, jedoch überwiegt der Einfluß des Belags (Abb. 3.12). Zwar treten die gleichen Bestandteile auf, jedoch in unterschiedlichen Intensitäten. So zeigt sich, daß am Belag das Magnetit (Fe_3O_4) überwiegt, bei der Scheibe jedoch nanokristallines Graphit (als Reibwertmodifizierer).

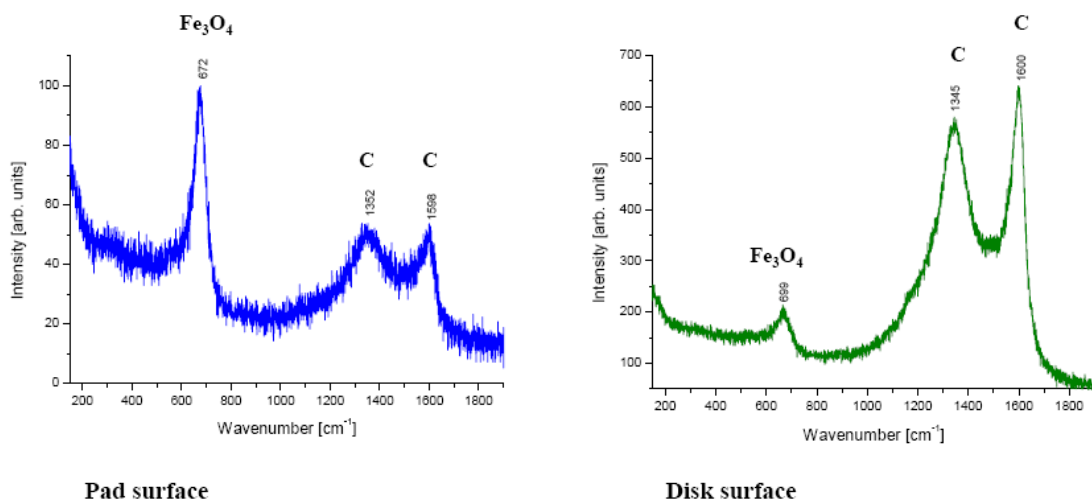


Abb. 3.12: Raman Spektrogramme der Reibfilme auf dem Belag (links) sowie der Bremsscheibe (rechts), aus [28]

Da die Bedeutung des Magnetits für den Reibprozeß sowie die tribochemischen Mechanismen besonders hoch ist, wird dem Belag gegenüber der Scheibe eine dominierende Rolle zuteil.

In [27] wurde zudem Cu_2O sowie CuFeO_2 (Kupfereisenoxid) im Reibfilm nachgewiesen. Es zeigt sich, daß die Reibfilmzusammensetzung demnach stark von der verwendeten Belagrezeptur beeinflusst wird, was ebenfalls in [29] bestätigt wird. Der hier genutzte Reibbelag wies einen deutlichen Anteil an Barium auf, welches sich in Form von BaSO_4 auch dominant im Reibfilm offenbarte.

Neben dem Metallübertrag aus der Scheibe in den Belag bzw. den Reibfilm haben speziell die Additive einen wichtigen Einfluß auf die Ausprägung und Bildung des Reibfilms. Hierbei kommen verschiedene Reibmodifizierer (eng.: Friction Modifier) für Umgebungstemperaturen (Graphit, MoS_2 , Sb_2S_3 , FeS) und Hochtemperaturbereiche (PbO , CrO_3 , CuO , Bi_2O_3 , ZnO , MoO_3 , Sb_2O_3 , CaF_2 , NaF) zum Einsatz.

Der Reibfilm kann die Reibpartner (Primär- und Sekundärplateaus) nahezu komplett überdecken oder lediglich an exponierten Bereichen (z.B. an Eisen- oder Messingspänen) vorliegen.

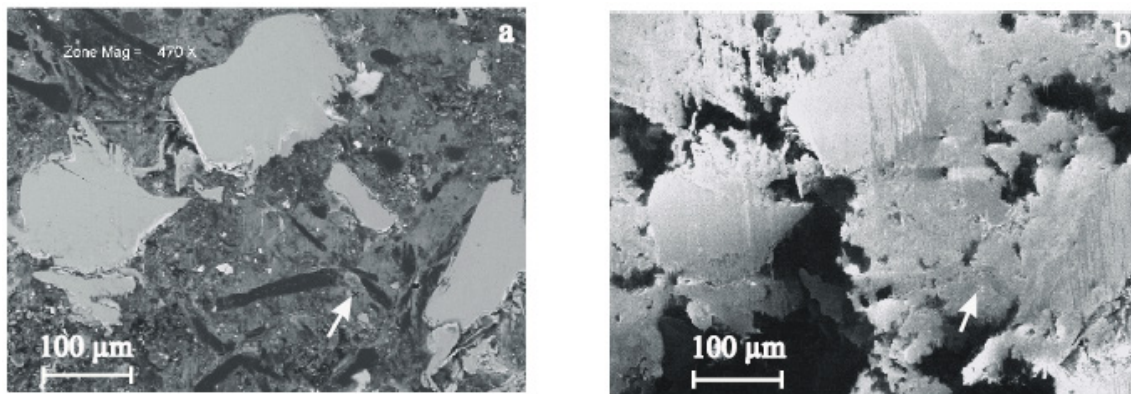


Abb. 3.13: Aufnahme einer Belagoberfläche mittels SEM (links) sowie SIM (rechts), aus [26]

Diese Aussagen wurden mit Hilfe eines Scanning Ion Microscope (SIM) erarbeitet, da die Auflösungen eines Scanning Electron Microscope (SEM) hierfür nicht ausreichend sind (Abb. 3.13). Die hier gezeigte Aufnahme

stellt die nahezu vollständige Bedeckung der Primär- und Sekundärplateaus mit dem Reibfilm dar (heller Kontrast), während unter Nutzung eines SEM lediglich partielle Bedeckungen zu erkennen sind.

Auch Desplanques et.al. [32] widmen sich der physikalisch-chemischen Analyse von Reibbelägen. Hierbei werden jedoch Sintermetall-Reibbeläge eines Hochgeschwindigkeitszuges bestehend aus mehreren Pins, von denen einer über mehrere Versuchszyklen an einem Schwungmassenbremsenprüfstand geprüft wurde, untersucht. Die Oberflächenanalysen erfolgten ausschließlich ex-situ. Es wird festgehalten, daß die Ausprägung des dritten Körpers in Pulverschichten (analog dem Reibfilm) und plattenartige Strukturen (der Reibschicht entsprechend) unterschieden werden kann (Abb. 3.14, links).

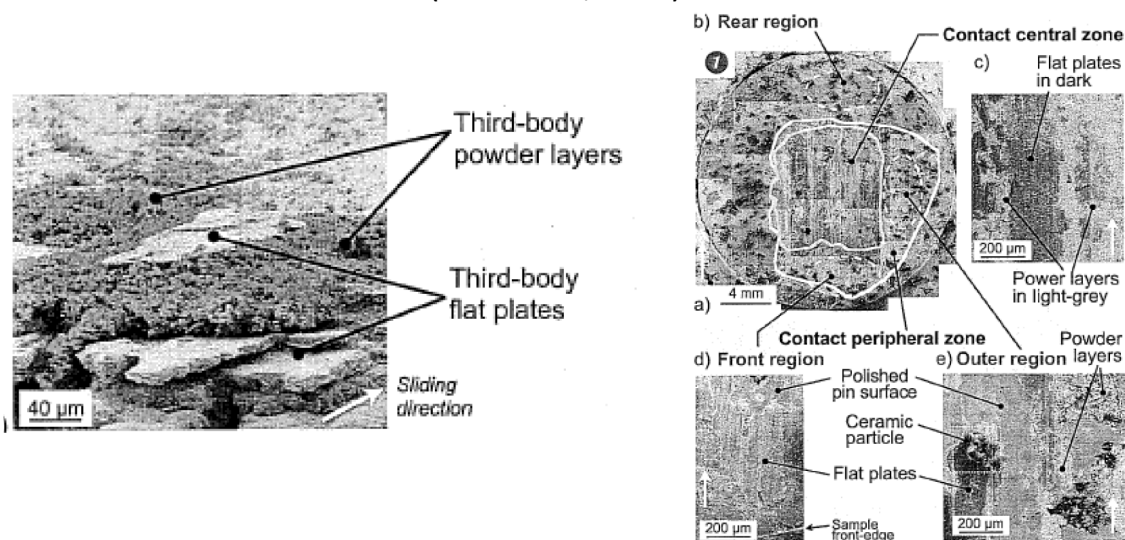


Abb. 3.14: plattenförmige Strukturen und Pulverschichten des dritten Reibkörpers (links), hinsichtlich Oberflächentopographie und drittem Reibkörper untersuchter Reibpin (rechts), aus [32]

Der untersuchte Reibpin (Abb. 3.14, rechts) ist klein genug, um von einer uniformen Belastung zu sprechen. Dennoch wird an verschiedenen Punkten analysiert (insgesamt 12 Meßpunkte in Bezug auf Mitte, Ein- und Auslauf). Es ist jedoch zu bemerken, daß ein typischer Eisenbahnreibbelag aus mehreren Reibpins besteht. Nach jedem Belastungszyklus erfolgten REM-Aufnahmen, EDX-Analysen jedoch nicht. Mit zunehmender Versuchsdauer

zeigte sich eine Ausdehnung der Reibzone, flache Patches übernehmen die Lastübertragung. Auf diesen Patches sind zudem feine Kleinstpartikel zu erkennen, auch wird ein interner Fluß des dritten Körpers erkannt (innerhalb der Reibzone).

Ferner stellen die Autoren fest, daß die Abriebpartikel aus der Reibzone austreten und wieder eintreten können. Auch können sich die Partikel in Vertiefungen und Porositäten anlagern, ebenso sind Partikelkanäle erkennbar. Herausstehende Partikel (als Keramiken identifiziert) spielen die Rolle von Hindernissen. Die ex-situ Betrachtungen lassen zwei Mechanismen der Third Body Entwicklung erkennen. Zum einen wird der dritte Reibkörper durch Partikel und -ströme gespeist. Diese setzen sich ab (an erhabeneren Bereichen) und bilden somit flache Plateaus, was einem dynamischen Entstehungsprozeß entspricht. Zum anderen ist der dritte Reibkörper vollständig ausgeprägt, flache Patches übernehmen die Lastübertragung, ändern sich jedoch nicht deutlich bezüglich ihrer Abmessungen, so daß von einem stationären Prozeß gesprochen wird.

Jene Arbeiten verdeutlichen, daß ex-situ Betrachtungen nur bedingt Rückschlüsse auf das dynamische Reibverhalten zulassen und weitergehende in-situ Untersuchungen anzustreben sind. Die vorgestellten physikalisch-chemischen Analysen sind zwar fest etablierte Verfahren, ein Optimierungspotential gerade in der Betrachtung kompletter Reibbeläge und der Untersuchung lokaler Besonderheiten ist dennoch festzustellen.

3.3 Klassifizierungsansätze

Im weiteren sollen etablierte Klassifizierungsansätze vorgestellt werden, mit deren Hilfe das Patchverhalten, die Ausprägung von Partikeln sowie das thermische Verhalten in Gestalt Thermoelastischer Instabilitäten charakterisiert werden können.

In Bezug auf **Patches** war es besonders die Gruppe um Jacobson (u.a. in [7]), die die Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärpatches prägte und etablierte. Diese Klassifizierung versteht unter den Primärpatches harte und robuste Matrixbestandteile, an denen sich losere

Abriebprodukte anlagern können. Jene bilden dann, zumal wenn sie durch den Reibvorgang verdichtet werden, die Sekundärpatches, die weniger robust sind. In Bezug auf solche Plateaus stellt Musiol [5] fest, daß plättchenförmige Verschleißteile mit Längen von bis zu 32 mm entstehen können. Man beachte dabei, daß es sich um verschlissene, abgelöste Produkte handelt. Angaben oder Klassifizierungen zu tragenden Patches (Primär- wie auch Sekundärplateaus) erfolgen jedoch nicht. Poeste [6] beschreibt Reibplatten mit variierenden Abmessungen, deren durchschnittliche Durchmesser er mit 50 µm bis 100 µm angibt. Auch Materialausbrüche des Belages werden erkannt (sogenannte „Fresser“ – ädhäsiver Verschleiß), jedoch werden keine Angaben zu möglichen Abmessungen vorgenommen. Interessant sind die hohen flächenmäßigen Anteile von Quarz in den untersuchten Reibbelägen, die das Patchverhalten nachhaltig beeinflussen.

Hinsichtlich der Klassifizierung von Patches gibt die Gruppe um Professor Jacobson (u.a. in [7]..[9]) Ausdehnungen (Durchmesser) zwischen 50 und 500 µm an, ihre Anzahl wird mit ca. 10^5 festgehalten. Der Anteil der Patches an der nominellen Belagoberfläche beträgt zwischen 10 und 30%, wobei diese Angaben interessanterweise ex-situ (und für moderate Betätigungen) durch mikroskopische Analysen ermittelt wurden. Es wird ferner festgestellt, daß anspruchsvolle Bremsungen größere Patches generieren können, die im Millimeterbereich liegen können, obgleich keine expliziten Beispiele vorgestellt werden. Die durchgeführten in-situ Untersuchungen lassen auch dynamische Aussagen zu. Für schnelle Prozesse wird konstatiert, daß die lasttragenden Flächen im Zehntelsekundenbereich wechseln, was durch Druckänderungen hervorgerufen wird. Hierbei wird in schnelle globale Prozesse (durch Bremsdruckänderungen, die die Fläche und Anzahl der Kontaktpatches ändern) und schnelle lokale Prozesse (bedingt durch lokale Kompressibilitätsunterschiede, die die lokale Flächenpressung mitbestimmen) differenziert. Daneben werden auch langsame Prozesse

erkannt, die sich im Sekundenbereich ereignen. Die Reibung führt zur Verlagerung und Umgestaltung von Kontaktpatches, was letztlich den Lebenszyklus der Patches (Aufbau, Existenz und Abbau) sowie deren mikro- und makroskalige Gestaltanpassungen bedeutet. Dezierte Angaben zu Patchdynamiken mit konkreten zeitlichen Bezügen bestehen jedoch auch bei diesen Arbeiten nicht.

Da die Forschergruppe des IDS (TU Braunschweig) als Basis der eigenen Modellierungsansätze hinsichtlich der Dimensionen von Patches experimentelle Angaben aus Uppsala nennt, bietet auch diese Quelle keine Informationen zu Klassifizierungsansätzen die Patchdynamik betreffend. [12]..[15]

Die Klassifizierung der **Partikel** bei Reibvorgängen erfolgt bis dato zumeist in Form der Partikelgröße. [78]..[80] Daneben werden auch Partikelströmungen inklusive zugehöriger Geschwindigkeitsvektoren analysiert, aber auch modelliert. Dies erfolgt jedoch für Verschleißprodukte außerhalb der Reibzone.

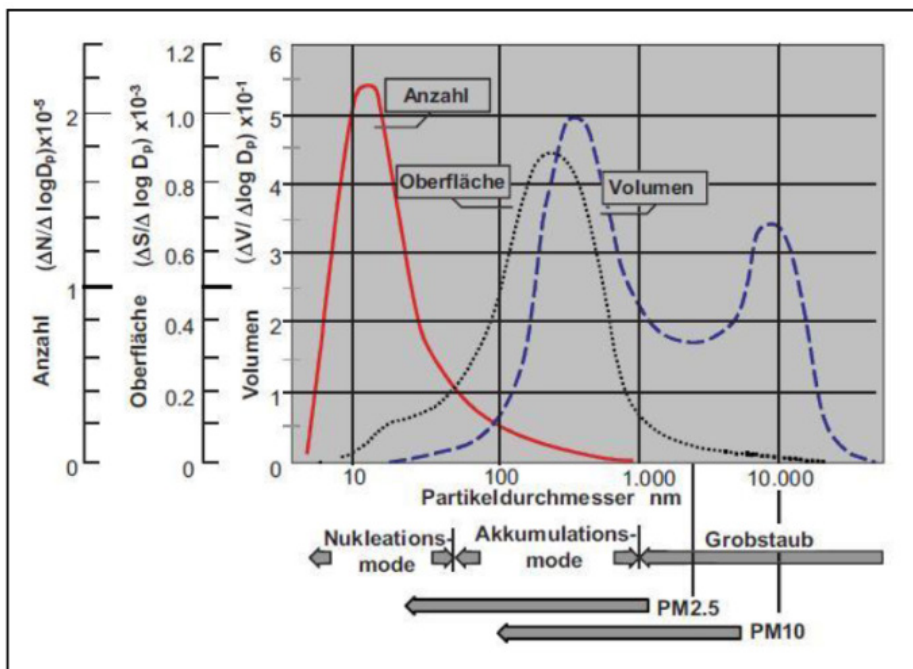


Abb. 3.15: Größenverteilung von atmosphärischen Partikeln, nach [78]

In Abb. 3.15 findet sich eine Unterscheidung zwischen den Modi Nukleation und Akkumulation sowie dem Grobstaubbereich. Diese können auch als nanoskalige (1 nm – 10 nm), submikroskalige (10 nm – 1000 nm) sowie mikroskalige Modi (1 µm – 10 µm) bezeichnet werden. Zumeist erfolgt jedoch eine Einteilung der Partikel gemäß der Partikelgrößenfraktionen (PM = Particulate Matter). Deren Nomenklatur ist als PM_x – Partikel definiert, und bezeichnet Partikel, die einen gröÙenselektierenden LufterinlaÙ passieren, der für den aerodynamischen Durchmesser von x µm eine Abscheidewirksamkeit von 50% aufweist. Typischerweise wird in die Größenklassen 0.3, 0.5, 1, 2, 5, und 10 µm unterschieden. Bedingt durch den Zusammenhang, daÙ das Volumen in der dritten Zehnerpotenz vom Durchmesser abhängig ist, zeigen sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der Größenverteilungen für die Kriterien Anzahl und Volumen. Man kann jedoch festhalten, daÙ sich die Untersuchungen, motiviert durch die Analyse des Feinstaubverhaltens von Radbremsen, auf den Bereich zwischen 50 und 300 nm konzentrieren (Abb. 13.4).

Auch wenn zumeist manuelle Vermessungen einzelner Partikel erfolgen, wurden durch Fulle [78] ex-situ Analysen von Staubpartikeln (an zuvor entnommenen Staubproben) mittels Bildauswertung durchgeführt (Abb. 3.16).

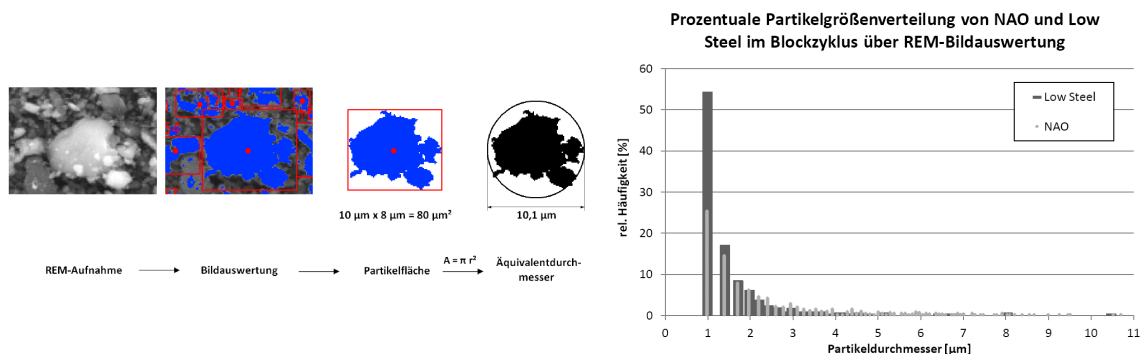


Abb. 3.16: Bestimmung von Partikelabmessungen mittels Bildauswertung (links), Partikelgrößenverteilung (rechts), aus [78]

Für die hierbei detektierten Partikel wurden die Äquivalentdurchmesser bestimmt, so daÙ eine Klassifizierung erfolgen konnte. Zu ergänzen ist, daÙ

lediglich Partikeldurchmesser bzw. Agglomerate in den Dimensionen von ca. 1 μm bis 10 μm (abhängig von der gewählten Vergrößerung) berücksichtigt wurden. Leicht kann erkannt werden, daß die untersuchten Staubproben im Bereich bis 2 μm die meisten Partikel aufweisen, ab 3 μm finden sich hingegen kaum mehr signifikante Partikelmengen. Dabei ist zu erwähnen, daß zum einen die Proben (entnommene Staubprobe), als auch zum anderen die Analyseeinstellungen (REM-Vergrößerung) sowie die Auswahl der klassifizierten Partikel (größere Agglomerationen wurden nicht berücksichtigt) vor dem Hintergrund von Staubanalysen gewählt wurden. Die Untersuchung von Reibbelägen bzw. den Vorgängen in der Reibzone kann daher andere Resultate hervorbringen.

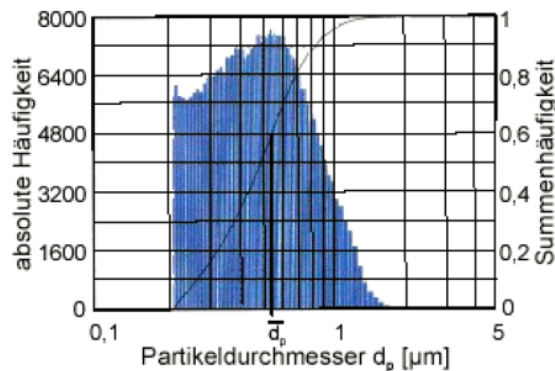


Abb. 3.17: Partikelklassifizierung gemäß Häufigkeit und Abmessung, nach [6]

Auch Poeste [6] widmete sich der Partikelklassifizierung. Er gibt bei seinen ex-situ Untersuchungen von separaten Staubproben mittlere Partikeldurchmesser von 0,55 – 0,61 μm an, wobei größere Durchmesser als 2 μm von ihm nicht betrachtet werden (Abb. 3.17). Die untere Auflösungsgrenze ist durch die technischen Möglichkeiten jener Zeit definiert und kann mit 0,2 μm angegeben werden. Die Klassifizierungen beziehen sich ausschließlich auf die Häufigkeiten in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers.

Weitere Aussagen hinsichtlich der Klassifizierung von Partikeln liefert auch die Gruppe um Professor Jacobson. [7]..[9]

Jedoch stellen sie lediglich fest, daß auf der Rückseite der Sekundärplateaus sich lose Partikel ansammeln, deren Abmessungen zwischen 0,1 und 1 µm betragen. Weitere Details zu dynamischen Aspekten oder auch, wie diese Klassifizierung ermittelt wurde, werden nicht gegeben.

Die Gruppe um Professor Ostermeyer stellt fest, daß eine Klassifizierung hinsichtlich Fasern, großen Partikeln (Durchmesser $\geq 500 \mu\text{m}$) und kleinen Partikeln (Durchmesser $\leq 50 \mu\text{m}$) sinnvoll ist und nutzt diese entsprechend als Basis für Simulationsmodelle für das thermische Verhalten von Reibbelägen [12]. Eine ähnliche Unterteilung wird auch in [83] vorgenommen. Hintergrund ist die Erstellung von Simulationsmodellen zur Abbildung von Preßprozessen, bei denen in Bindungspartikel, Strukturpartikeln und Faserpartikel unterschieden wird (Abb. 3.18).

Jedoch erfolgen keine expliziten Größenangaben der Partikel, auch handelt es sich um die Berücksichtigung von ursprünglichen Rohstoffen und nicht von Abriebpartikeln als Ergebnis des Reibprozesses.

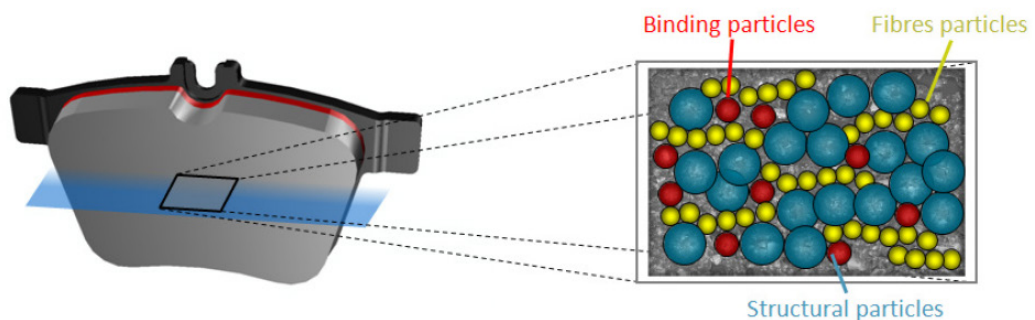


Abb. 3.18: Partikelklassifizierung für eine Reibmatrix, nach [83]

Neben den vorgestellten ex-situ Betrachtungen hat eine Gruppe um Professor Augsburg (TU Ilmenau, u.a. [81], [82]) die partikelbeladene Strömung um die Radbremse experimentell und simulativ untersucht. Es handelt sich dabei um Betrachtungen außerhalb der Reibzone, die den Transfer und die Sedimentation der Partikel betreffen. Die Strömungen wurden experimentell mit Hilfe der PIV-Methode (engl.: Particle Imaging

Velocimetry) und einem geeigneten Aerosol oder Partikelemissionen der Bremse erfaßt und analysiert, was die Erstellung von Geschwindigkeitsvektorfeldern zur Strömungscharakterisierung ermöglichte. Die zeitabhängige Visualisierung der Partikel und damit die Beschreibung der Partikelausbreitung erfolgten mittels Laserlichtschnittaufnahmen während der Bremsung. Mit dieser Datenbasis wurden anschließend die erstellten Simulationsmodelle validiert, welche die Grundlage für weiterführende Betrachtungen sind. Zielsetzung ist letztlich ein Simulationswerkzeug, um z.B. den Einfluss von Bauteilmodifikationen auf Bremsstaubemissionen zu prüfen. Es ist jedoch nicht das Anliegen dieser Arbeiten, eine Klassifizierung bzw. statistische Analyse der Geschwindigkeitsfelder vorzunehmen, so daß solche Erkenntnisse nicht vorliegen.

Hinsichtlich der Klassifizierung von Thermoelastischen Instabilitäten bzw. der damit verbundenen Phänomene **Hot Banding** und **Hot Spots** liefert Poeste [6] eine Charakterisierung in vier Typen. Diese erfolgt dabei hinsichtlich Größe, Form und Temperatur, wobei ausschließlich der Reibring betrachtet wird. Als einen Typ I beschreibt Poeste den kleinsten Typ der Hot Spots, der aus einem direkten Asperitkontakt resultiert. Die Flecken sind deutlich kleiner als ein Millimeter im Durchmesser. Ihre Temperaturen können nur grob geschätzt werden und liegen oberhalb von 900°C. Der Typ II ist gekennzeichnet durch das Auftreten von Temperaturgradienten über den Scheibenradius, so daß makroskopische Hot Spot Bänder konzentrisch über den kompletten Umfang verlaufen. Zeitliche Veränderungen der radialen Position sind möglich. Ihre Ausdehnung in radialer Richtung kann einige Millimeter betragen, während die Temperaturen über 900°C liegen. Für den Typ III werden Temperaturgradienten in Abhängigkeit von der Winkelposition (in Umfangsrichtung) erkannt. Diese sind durch kleinste Inhomogenitäten wie Rauheiten, Abriebpartikel etc. hervorrufbar. Als Ausdehnung der Temperaturgradienten werden einige Millimeter angegeben. Der Typ IV

berücksichtigt Hot Spots als Produkt aus den Typen II und III, was Temperaturgradienten auf Bändern des gleichen Radius der Scheibe bedeutet. Er ist durch eine punktuell reguläre Verteilung gekennzeichnet, während die Durchmesser der Flecken bis zu einigen Zentimetern betragen können.

In [22] wird die Anzahl der Hot Spots erfaßt, wobei es sich um den Typ IV handelt. Zwischen 8 bis 20 Hitzeflecken werden auf einem Reibring beobachtet. Zudem können diese sich auf einer Spur bzw. einem Ring oder zwei Spuren bzw. Ringen befinden. Angaben zur Dynamik der Veränderlichkeit erfolgen nicht.

Auch Steffen [84] nennt lediglich die Anzahl der Hot Spots als Kriterium, wobei er sich ausschließlich auf den Typ IV konzentriert. Die Ausprägung der Flecken (Anzahl, Intensität) ist demnach u.a. vom Durchmesser der Scheibe abhängig, Aussagen zur Verlagerungsdynamik werden allerdings nicht vorgenommen.

3.4 Analysen der Reibbelagkompressibilität

Der Begriff der Kompressibilität wird in Industriekreisen ([33], [34], [35]) in Bezug zu Entwicklungsaufgaben (Beeinflussung der Belageigenschaften), die sich Themen wie Bremsgeräuschen, Eigenfrequenzen, Rubbeln, Pedalgefühl, Porosität / Dichte, Verschleiß, Rißverhalten u.a. widmen, und der Qualitätssicherung (Fertigungsprozeß) gesetzt. Sie ist damit eine äußerst relevante physikalische Belageigenschaft. Als äquivalente Eigenschaft kann die Steifigkeit angesehen werden, die in der Literatur häufig der Kompressibilität gleichgesetzt wird.

Gemeinhin wird laut [43] versucht, zu niedrige Kompreßwerte zu vermeiden, um somit Bremsgeräusche, Hitzeflecken (engl.: Hot Spots) und Rißbildungen der Bremsscheiben zu verhindern. Zu hohe Kompreßwerte indes beeinträchtigen das Pedalgefühl und können dazu führen, daß der maximale Pedalweg bereits erreicht wird, obgleich der maximale Bremsdruck noch nicht erreicht wurde. Die Kompressibilität kann weite Wertebereiche umfassen und große Streuungen aufweisen, die ganz

besonders durch den Fertigungsprozeß bestimmt sind, wie Abb. 3.19 verdeutlichen soll.

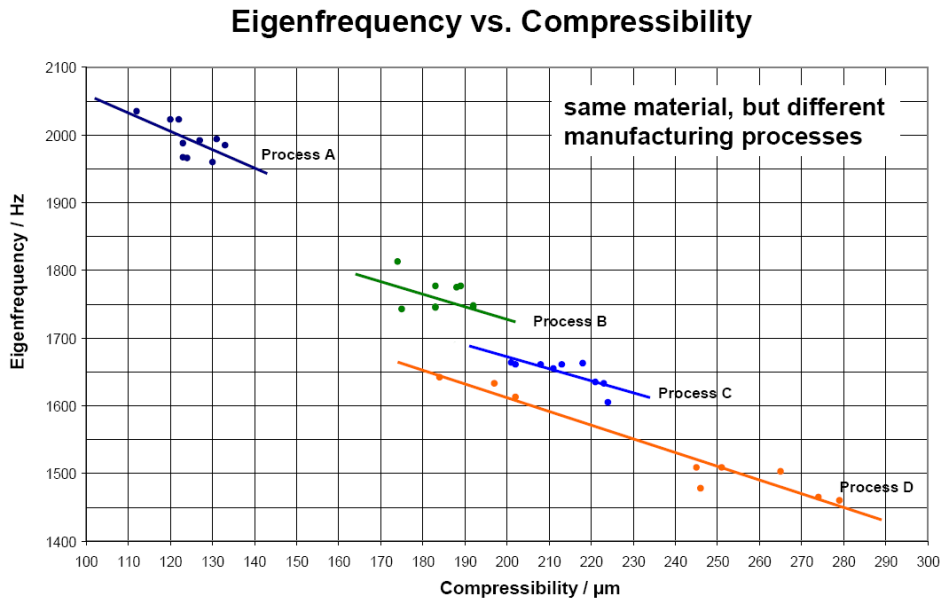


Abb. 3.19: Abhängigkeit der Belageigenfrequenzen von der Kompressibilität und dem Fertigungsprozeß, nach [33]

Laut [34] gilt sie als nicht konstanter Wert, der u.a. abhängig von der Reibtemperatur, der mechanischen Belastung (Bremsdruck), der Belastungsfrequenz (Dynamik) und auch der Belastungsrichtung ist. Die möglichen Einflußgrößen stellt [35] gegenüber, wobei er besonders auf die Bedeutung der Ebenheit und Parallelität von Matrix und Rückenplatte, die Unterschiede zwischen statischer und dynamischer Prüfung, den Einfluß von Sekundärmaßnahmen wie Chamfer und Shims hinweist und zusammenfassend feststellt, daß ein singulärer Parameterwert nicht die Besonderheiten des Reibbelages berücksichtigen kann und es daher neuer Ansätze bedarf.

Im folgenden sollen die etablierten Standardverfahren kurz vorgestellt werden. Die **mechanische Kompression** stellt die wohl gebräuchlichste Möglichkeit der Bestimmung der Kompressibilität von Reibbelägen durch eine mechanische Verformung dar und ist weltweit in drei Standards

geregelt. Genutzt werden spezielle Prüfmaschinen, die die erforderlichen mechanischen Belastungen ebenso aufbringen wie auch eine thermische Konditionierung berücksichtigen können. Auch ist die erforderliche Sensorik, die im wesentlichen die aufgeprägte Kraft sowie die Belagverformung erfassen soll, spezifiziert. [37], [38], [39]

In [36] wird ein oft zitierter Versuch der Harmonisierung unternommen, der die Methoden DIN ISO 6310 sowie JIS D 4413 beschreibt und gegenüberstellt. Hierbei kommt ein kompletter Reibbelag zum Einsatz. Die Aktuierung erfolgt über Kolbenadapter bzw. Druckplatten, druck- oder weggeregelt. Um ein möglichst genaues Bild zu erhalten, werden mindestens 3 Aktuierungen unmittelbar aufeinanderfolgend vorgenommen. Aus Abb. 3.20 wird deutlich, daß der Kompressibilitätswert ein integraler Parameter ist, der globalen Charakter besitzt. Lokale Unterschiede der Matrix können demnach nicht erfaßt werden.

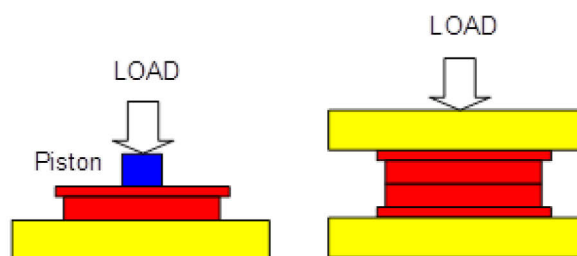


Abb. 3.20: Aktuierungsschema DIN ISO 6310 (links) sowie JIS D 4413 (rechts), nach [36]

Die Autoren stellen fest, daß eine Variation der Verfahrensgeschwindigkeit keine Unterschiede bedeutet sowie, daß drei Aktuierungen genügen.

Der **akustischen Werkstoffprüfung mittels Ultraschall** widmen sich der Standard [40], aber auch [41]. Bei diesem Verfahren werden Ultraschallwellen in die Reibbelagprobe eingeleitet, erforderlich sind hierfür eine Ultraschall Sender- / Empfängereinheit sowie ein Frequenzgenerator. Eine besondere Rolle kommt dem Kopplungsmedium zu, welches zwischen Sender bzw. Empfänger sowie dem Prüfling plaziert wird. Es soll eine möglichst optimale Anbindung ermöglichen, jedoch die Anregung bzw. Messung durch Dämpfungseffekte nicht beeinträchtigen.

Neben der Durchschallung wird die Probe auch mechanisch mit einem Druck von 40 bar statisch belastet. Berücksichtigt werden keine Kompletbeläge, sondern Probenausschnitte. Sie müssen hohen Anforderungen an Parallelität genügen sowie geringe Rauheiten aufweisen. Über die Probenabmessungen und erfaßten Laufzeiten können die Schallgeschwindigkeiten ermittelt werden. Aus ihnen werden dann die elastischen Konstanten berechnet. Mit deren Hilfe können im weiteren die E- und G-Moduli ermittelt werden, um sie anschließend beispielweise für die Parametrisierung numerischer Simulationsmodelle (FEM) zu verwenden.

Neben den etablierten Verfahren gibt es auch wichtige aktuelle Trends, die an dieser Stelle vorgestellt werden und somit den aktuellen Stand um zukünftige Erweiterungen ergänzen sollen.

Da die Kompressibilität als dynamische Eigenschaft bekannt ist, gibt es gerade vor dem Hintergrund komfortrelevanter Probleme die Absicht, dynamische Prüfungen vorzunehmen und die **dynamische Steifigkeit** zu ermitteln. In [41] widmeten sich die Autoren der Prüfung im niederfrequenten Lastbereich, der besonders für Rubbelphänomene (engl.: judder) relevant ist. Es erfolgt die Betrachtung des Steifigkeitsverhaltens in axialer und auch tangentialer Richtung. Axial wird festgestellt, daß die Steifigkeit der Matrix mit zunehmender Frequenz steigt. Dies läßt visko-elastisches Materialverhalten erkennen, auch wenn keine signifikante Änderung der Hysterese in Bezug auf Frequenzvariationen festgestellt wurde. Es wird ergänzt, daß dieses visko-elastische Materialverhalten insbesondere für moderate Lastbereiche vorliegt und demnach von einer deutlichen Lastabhängigkeit gesprochen werden kann. Auch Tangential wird visko-elastisches Verhalten erkannt, welches besonders in den niedrigen Belastungsbereichen liegt.

Daneben widmen sich ebenfalls [42] der dynamischen Belagsteifigkeit vor dem Hintergrund komfortrelevanter Problemstellungen. Der speziell entwickelte und genutzte Versuchsaufbau vermag Frequenzen bis 4 kHz

anzuregen und berücksichtigt einen eher moderaten Lastbereich bis 25 bar, was den typischen Betriebsparametern bei NVH-Problemen entspricht. Untersucht werden keine Komplettbeläge, sondern spezielle Probenzuschnitte. Dabei zeigt sich nicht nur, daß die Steifigkeit mit zunehmender Belastung steigt, sondern auch mit abnehmender Belagdicke zunimmt. In Bezug auf die dynamischen Einflüsse wird festgestellt, daß sowohl die Steifigkeitsniveaus, als auch die Belastungsabhängigkeiten höher ausfallen als bei statischen Messungen.

Der Berücksichtigung des optimalen **Lastbereichs** widmen sich [33] und [43]. Sie schlagen die Reduktion der Vorlast von aktuell 5 bar auf 0,1 bis 0,3 bar vor. Hintergrund ist die Möglichkeit, daß ein kritisches Verformen durch eine zu hohe Vorlast maskiert werden könnte und somit die Phase des Belaganlegens nicht korrekt charakterisiert wird. Auch sollen die maximalen Belastungen den NVH-relevanten Druckbereichen bis maximal 30 bar angepaßt werden.

Ein weiterer Trend bezieht sich auf die **spezifische Kompressibilität**. So äußert [33], daß zukünftig vermehrt die Bestimmung der Kompressibilität des reinen Belagmaterials im Fokus stehen sollte. Die Notwendigkeit nach Komponenten und Subkomponentenprüfungen indes führt [34] aus. Zudem ergänzt [43], daß die Prüfung großer Beläge kritisch ist: Beläge werden demnach in Probenstücke zerlegt oder nur partiell belastet. Auch sind Ansätze beschrieben, nach denen mit einer spezifischen Belastung über einem nicht-veränderlichen Kolbenadapter aktuiert wird.

Der letzte aktuelle Trend widmet sich dem **Belagsetzverhalten für Daueraktuierungen**. Gemeint ist damit laut [33] der Einsatz von Reibbelägen in elektrischen Parkbremsen (EPB), die die klassische Feststellbremse zunehmend vom Markt verdrängen. Ergänzend führt [43] aus, daß sich das Belagmaterial visko-elastisch verhält und Relaxationsverhalten zeigt. Besonders kritisch ist dies dann, wenn die Bremse unter hohen Temperaturen betätigt wird und sich anschließend

abkühlt. Aufgrund des schrumpfenden Belages genügen die Haltekräfte nicht länger und das gesicherte Fahrzeug kann wegrollen.

Abschließend und zusammenfassend kann festgehalten werden, daß auch die aktuellen Trends und Vorschläge auf einen globalen, integral bestimmten Kompressibilitätswert abzielen. Aussagen und Erkenntnisse zu lokalen Besonderheiten sind bis dato nicht bekannt und bedeuten einen wichtigen Forschungsbedarf in Ergänzung zu lokalen Betrachtungen des Reibverhaltens.

3.5 Analysen der Reibbelagporosität

Verschiedene Verfahren haben sich zur Bestimmung der Porosität, etabliert. Diese kann sich verschiedentlich darstellen, wie in Abb. 3.21 zu erkennen ist, und bezeichnet gemeinhin Defektstellen bzw. Defektstellenbereiche in einem Festkörper.

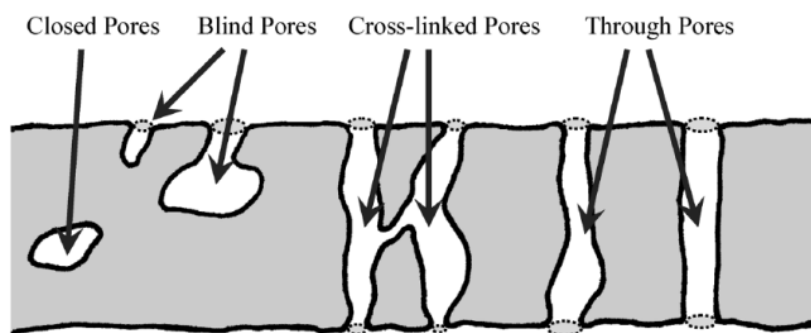


Abb. 3.21: Klassifizierung von Porenarten nach [54]

Bei **penetrierenden Verfahren** wird der Prüfling ganz allgemein mit einer Substanz durchtränkt. Es ist dabei offensichtlich, daß möglichst offenporige Proben untersucht werden. Eine Analyse geschlossener Poren ist nicht möglich. Beim **Füllen mit Fremdstoffen** wird den Poren unter Vakuum zunächst Luft entzogen. Diese werden anschließend mit einem flüssigen Füllstoff getränkt. Anschließend wird von dem Prüfling eine Schliiffprobe erstellt, bei der im weiteren unter Nutzung einer Elementanalyse der Füllstoffanteil ermittelt wird. Diese Methode ist sehr genau und erlaubt Aussagen über die örtliche Porenverteilung (in Oberflächennähe). Jedoch

ist sie sehr zeitaufwendig und stellt ein zerstörendes Analyseverfahren dar. [44]

Im Rahmen der **Quecksilberporosimetrie** wird der Prüfling (auch Rohmaterialien, wie im Fall von Reibbelägen) in ein Porosimeter eingelegt. Das Quecksilber wird dann unter Druck in die poröse Matrix eingebracht und der Volumenstrom gemessen. Unter Vorgabe des geometrischen Volumens und des eingedrungenen Quecksilbers kann die Gesamtporosität bestimmt werden. Die Methode erlaubt die Bestimmung der Porenabmessungen, Porenverteilung, Materialkompressibilität, Permeabilität sowie der spezifischen Oberfläche. Die Grenzen des Verfahrens können jedoch kritisch sein. Es sind keine geschlossenen Poren zu ermitteln, Quecksilber kann mit metallischen Bestandteilen (z.B. der Reibmatrix) reagieren und Verbindungen eingehen (kritisch beim Vergleich der Extrusions- und Intrusionskurven). Auch das Handling des Quecksilbers muß berücksichtigt werden: es ist toxisch, was wiederum beim Arbeitsschutz und der Entsorgung der Proben bzw. Prüflinge beachtet werden muß. Das Verfahren ist zerstörungsfrei, jedoch bleiben, bedingt durch die Hysterese, Quecksilberanteile im Prüflinge. Eine Wiederverwendbarkeit ist daher mindestens kritisch zu hinterfragen. [44], [45]

Bei der **Pyknometrie** wird der Prüfling zunächst vermessen (Masse, Volumen), um anschließend mit einem bekannten Medium penetriert zu werden. Die anschließend ermittelte Massendifferenz (bei bekannter Dichte des Penetrationsmediums) erlaubt die Bestimmung der Porosität. Alternativ kann auch der Volumenstrom des Penetrationsmediums (z.B. Helium) gemessen werden. Auch dieses Verfahren ist zerstörungsfrei, bedeutet bei Nutzung von Helium auch keine nennenswerte Manipulation des Prüflings, so daß eine Wiederverwendung möglich ist. Eine Aussage zur Porositätsverteilung ist indes nicht möglich. [46], [47]

Die klassische **Röntgenprüfung** stellt ein **durchstrahlendes Verfahren** dar. Genutzt wird dabei eine Aufzeichnung auf Filmmaterial, welches im

weiteren optisch auszuwerten ist. Diese zerstörungsfreie Methode erlaubt die Bestimmung der örtlichen Porositätsverteilung. Jedoch sind Überlagerungen der Porositäten bzw. Defektstellen möglich, insbesondere bei dickeren Prüflingen. Auch bedeuten Bereiche mit höherer Dichte eine Zunahme von Streueffekten. Zudem liegen die Daten nicht digital vor. [48] Bei der **Computertomographie** wird der Prüfling ebenso durchstrahlt, ein Sensor ermittelt jedoch nun die Strahlenintensität. Der Tomograph nimmt den Prüfling dabei aus verschiedenen Perspektiven auf, der Computer ermittelt aus den Positionen und Sensordaten die Dichteverteilung im Prüfling. Die Porosität kann anschließend per Bildverarbeitung ermittelt werden. Auch diese Methode ist zerstörungsfrei und erlaubt eine Bestimmung der örtlichen Porositäten, sogar dreidimensional. Sie bietet ebenso den Vorteil, daß geschlossene Poren ermittelt werden können. Nachteilig wirkt sich aus, daß Bereiche höherer Dichte verstärkt zu Streuungen führen können. [48]

Neben der allgemeinen Vorstellung von Verfahren zur Porositätsbestimmung soll ein kurzer Überblick über Arbeiten gegeben werden, die sich der Bestimmung von Porositäten bei Reibbelägen widmen. Der in [49] dargelegte Standard ist die wohl gebräuchlichste Methode, basierend auf der Pyknometrie und demnach ein penetrierendes Verfahren darstellend. Die Porosität wird als prozentualer Anteil des Volumens des absorbierten Öls (Anm.: Penetrationsmedium) zum Gesamtvolumen des Prüflings (Matrixausschnitt eines Bremsbelages) definiert.

Der Charakterisierung von Rohmaterialien widmet sich [50]. Für weitergehende Untersuchungen hinsichtlich des Reibverhaltens werden NAO-Beläge verwendet, die mit Kalium-Titan-Fasern verstärkt werden. Dieses Kaliumtitanat ist gleichzeitig die Basis der Ermittlung physikalischer Eigenschaften, wie u.a. die Porosität. Die Porosität wurde gemäß dem Standardverfahren JIS D 4418 bestimmt, nähere Ausführungen hierzu sind jedoch nicht getroffen. Da es sich um eine reine Oberflächenanalyse handelt, sind keine Angaben zur dreidimensionalen Porositätsverteilung

gemacht. Der Bereich der absoluten Porositätswerte für die verschiedenen Proben schwankt zwischen 4 und 12 %.

In [51] werden zwei zugeschnittene C/SiC-Rezepturen (eine davon ist siliziumfrei) untersucht. Die Bestimmung der Porosität erfolgt gemäß DIN EN 623-2, der sogenannten Archimedes Methode. Dabei wird festgestellt, daß durch das Entfernen des Rest-Siliziums bei dem zweiten Prüfling die Porosität steigt (Abb. 13.2). Ferner stellen die Autoren fest, daß die mechanische Stabilität mit der gestiegenen Porosität sinkt, obgleich keine konkreten Zahlenangaben der Stabilität gegeben werden. Durch die erhöhte Porosität bemerkt man ebenfalls, daß die maximale Temperatur nicht auf über 255°C steigt, so daß sich ein günstigeres thermisches Verhalten ergibt.

Mit der Charakterisierung von Phenolharzen in NAO-Reibbelägen beschäftigen sich [52]. Die Basis stellen EPMA (engl.: electron probe microanalyzer) Analysen dar, um Element- und Porositätsanalysen vorzunehmen. Genutzt wird hierfür ein Penetrationsverfahren, bei dem der Füller mit Chlor markiert wird. Anschließend können die Poren unter Nutzung der EPMA untersucht werden. Das Porositätsmessung erfolgte nach dem Standard JIS D 4418, wobei die Porositäten für verschiedene Phenolharze mit 4,8 bis 6,4% angegeben werden. Nachteil des Verfahrens ist es, daß nur offene Poren erfaßt werden. Es handelt sich zudem, um Probenquerschnitte zu analysieren, um keine zerstörungsfreie Methode.

Die Autoren von [53] erkennen, daß einige Rohmaterialien zwar die gleiche chemische Zusammensetzung besitzen, jedoch zeigen sie unterschiedliches Reibverhalten. Daher ist die Charakterisierung physikalischer Parameter relevant. Zur Bestimmung der Porosität wird die Quecksilberporosimetrie genutzt. Sie ist laut den Autoren die am weitesten verbreitetste Methode, um Belagrohmaterialien zu charakterisieren. Bestimmt werden dabei die totale Porosität, die Abmessungen der Poren sowie die Interaktion der Poren mit Quecksilber. Auch werden absolute Porositäten von Reibbelägen vorgestellt.

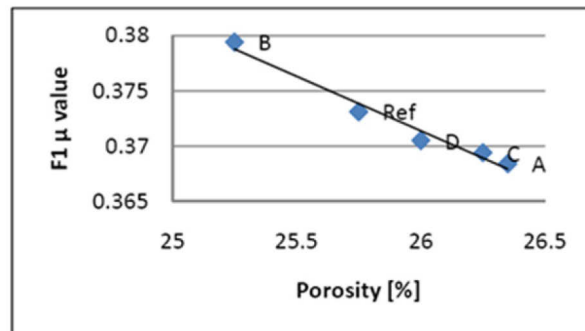


Abb. 3.22: Abhängigkeit des Reibwerts von der Porosität, aus [53]

Zudem erfolgt eine Betrachtung zu möglichen Abhängigkeiten des Reibwertes von der Porosität (Abb. 3.22). Die getroffenen Aussagen sind jedoch kritisch zu hinterfragen, da die Reibwerte nur sehr geringe Abweichungen zeigen, was ebenso für die Porositäten gilt.

Auch in Quelle [54] wird die Quecksilberporosimetrie (Verwendung eines Quantachrome PoreMaster-33) genutzt. Die Autoren führen aus, daß die Quecksilberporosimetrie häufig zur Charakterisierung poröser Werkstoffe genutzt wird und sich das Verfahren bei der Charakterisierung von Rohmaterialien etabliert hat. Untersucht werden komplette Reibbeläge einer NAO-Rezeptur. Auch erfolgt ein Vergleich zur Penetration mit Helium (Abb. 13.3). Da das Helium auch kleinere Poren ausfüllt, sind die Werte der Porosität bei dieser Methode höher als bei der Quecksilberporosimetrie.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß in Bezug auf Reibbelaguntersuchungen sich penetrierende Verfahren etabliert haben. Diese erlauben jedoch, methodenbedingt, nicht die Berücksichtigung geschlossener Poren. Auch ist es eine integrale Betrachtungsweise, orts aufgelöste Porenverteilungen sind nicht ermittelbar. Kritisch hinterfragt werden müssen auch Aspekte wie der Umgang mit toxischen Medien (bei der Quecksilberporosimetrie), Hystereseeffekte sowie die eventuelle Weiter- oder Wiederverwendung von Prüflingen.

Alternative Verfahren sind daher besonders interessant und ein entsprechender Bedarf kann konstatiert werden. Die Nutzung der

Computertomographie soll im weiteren näher betrachtet werden und eine Alternative aufzeigen.

3.6 Charakterisierungs- und Klassifizierungsmethoden

Für die methodische Charakterisierung und Klassifizierung von Videodaten, wie sie bei der in-situ Betrachtung von Reibprozessen entstehen, ist die Nutzung der digitalen Bildverarbeitung unabdingbar. Nur sie erlaubt es, große Bildmengen und Informationsgehalte zu extrahieren und zu verarbeiten. Durch sie werden Bild- und Videoinformationen so aufbereitet, daß sie für weitere Analysen zur Verfügung stehen und Klassifizierungen erlauben. Im Folgenden wird daher ein Überblick über die Grundlagen der digitalen Videoanalyse, bildverarbeitenden Objekterkennung und –verfolgung sowie der Bewegungsanalyse gegeben. Dies soll die Basis bereiten, um Auswertungen der Partikel- und Patchdynamik ebenso durchzuführen wie Analysen zur Ausprägung von Hot Spots auf der Belagoberfläche sowie das Porositätsverhalten des Reibbelags zu charakterisieren.

Die digitale Bildverarbeitung hat sich in der Vergangenheit zu einem viel beachteten und bedeutsamen Wissenschaftsbereich entwickelt. Verbesserungen hinsichtlich Rechentechnik, Algorithmen (Objektdetektion und –verfolgung, Datenkompression usw.) und Video- bzw. Fototechnik haben dazu beigetragen, daß zahlreiche Anwendungsgebiete wie u.a. das Zählen und Vermessen von Objekten 2D und 3D, die Zuordnung von Objekten zu Klassen (Klassifizierung) oder auch die Objektverfolgung in Videosequenzen immer wichtiger wurden. Die industrielle Nutzung nimmt stetig zu und stellt ein hohes Marktpotential dar. [65], [69]

Speziell in Bezug auf Partikelanalysen hinsichtlich ihrer Position und Bewegung ist der Bedarf enorm groß, besonders im Bereich der Medizin und Biotechnik (Zellpartikel, Viruspartikel etc.). Auch wenn einige Forscher einheitlich 10 nm als detektierbare Partikelgröße angeben, wobei die Bildpartikelgröße dabei typischerweise zwischen 30 und 150 nm/Pixel (engl.: Bildelement) liegt, gibt es doch kaum vollständige Analysen verschiedener Tracking-Methoden für den Zweck der Partikelanalyse.

Daher ist es erforderlich, im Vorfeld der angestrebten Untersuchungen verschiedene Methoden auf ihre Tauglichkeit hin zu untersuchen. [66]

3.6.1 Digitale Videoanalyse

Die digitale Videoanalyse ist eine videobasierte Erkennung und Interpretation von Informationen, die im Video enthalten sind. In diesem Teilkapitel sollen die dafür notwendigen Voraussetzungen sowie Hintergründe kurz vorgestellt werden.

Zu Beginn einer Videoanalyse steht die Bilderzeugung und Digitalisierung. Die Anordnung von Sensorelementen eines Bildsensors wandelt die kontinuierliche Lichtverteilung in eine diskrete, man spricht von einer räumlichen Abtastung. Diese ist bestimmten Belichtungszeiten unterworfen, was zu einer zeitlichen Abtastung führt. Das so repräsentierte Objekt durchläuft anschließend eine Quantisierung bei der z.B. die Wandlung in ein Graustufen-Bild erfolgt (Abb. 3.23). [65]

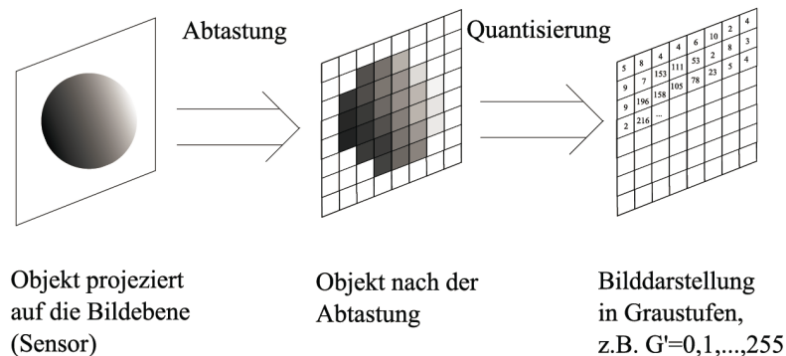


Abb. 3.23: Bilderzeugung nach [65]

Die Videoanalyse wird meist im Kontext der Informatik gesehen und ist als eine Spezialisierung der Bildverarbeitung zu verstehen. Im allgemeinen berücksichtigt sie die Bildaufnahme, der sich die Objektidentifikation und Objektverfolgung (welche als zentrale Elemente in den Kapiteln 3.6.2 und 3.6.3 separat betrachtet werden) anschließen. Die Ausgabe der Bewegungsdaten ist der finale Bestandteil der Videoanalyse.

Man unterscheidet in die kognitive und die automatische Videoanalyse. Während die kognitive Analyse auf Erfahrungen des menschlichen

Betrachters beruht und keine quantifizierbare Analysen der Distanzen o.ä. vorsieht, besitzt die automatische Videoanalyse als zentrale Funktionen die Merkmalsextraktion, die Klassifikation sowie die Bewegungsanalyse. Letztere hat die Erstellung von Zeitreihen zum Ziel, um quantitative Verläufe einer Bewegungsgröße (Wege, Geschwindigkeiten, Richtungen, Abstände zwischen Objekten) in zeitdiskreter Form zu beschreiben. [59]

Neben der allgemeinen Beschreibung der Videoanalyse sind auch ganz konkrete Softwarelösungen von Interesse, die für die Anwendbarkeit auf die späteren in-situ Untersuchungen untersucht werden.

Die Möglichkeiten und der Einsatz von *measure Dynamics* für den Physik-Unterricht werden in [58] beschrieben. Dieses Werkzeug der Videoanalyse bietet bezüglich der Objekterkennung eine reine Farbanalyse, eine Bewegungserkennung und eine Kombination aus beiden Varianten an. In jedem wird ein guter Kontrast (homogener, gleichmäßiger Hintergrund) zum Meßobjekt vorgeschlagen, auch wenn der Analysebereich eingeschränkt werden kann. Für eine erfolgreiche Quantifizierung wird eine dynamische Bildabtastrate (engl.: *frame rate*) als kritisch eingeschätzt, da der zeitliche Bezug der Weginformation variiert.

Das Programm selbst verfügt über verschiedene Filtermöglichkeiten. Die Analysen können manuell, aber auch automatisch erfolgen. Im Ergebnis lassen sich die gewonnenen Bilder, Diagramme und manipulierten Videos exportieren. Mögliche Fehldetektionen können zu unrealistischen Sprüngen in den Geschwindigkeits-Zeit-Diagrammen führen, was jedoch durch eine manuelle Eingriffsmöglichkeit sowie einer Signalglättung (z.B. Nutzung jedes zweiten Bildes) kompensiert werden kann.

Auch [60] beschreibt die Möglichkeiten der Videoanalyse anhand einer ausgewählten Software, in diesem Fall jedoch für *VIANA*. Hintergrund der Betrachtungen sind didaktische Untersuchungen, typischerweise Bewegungsabläufe, die für den Physikunterricht interessant sind und aufbereitet werden sollen. Das Programm ist in der Lage, mit Hilfe der *Frame Rate* (engl.: *fps = frames per second*) den zeitlichen Abstand zwischen den Bildern ebenso zu ermitteln wie die realen Wege bzw. Ausdehnungen, die sich über einen mitgefilmten Maßstab bestimmen lassen. Die automatischen Auswertungen basieren bei diesem Programm

auf den Farbinformationen des Objekts, wofür jedoch farbintensive und kontrastreiche Bilder notwendig sind.

3.6.2 Bildverarbeitende Objekterkennung

Die bildverarbeitende Objekterkennung betrifft die Objektidentifikation und beinhaltet verschiedene Schritte (Abb. 3.24).

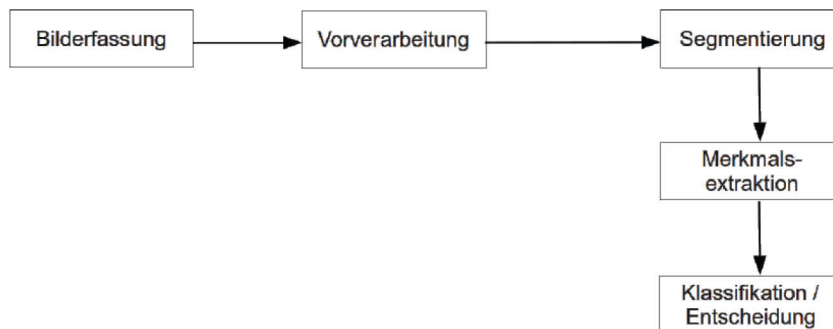


Abb. 3.24: Bildverarbeitungsschritte der Objekterkennung, nach [55]

Neben zahlreichen bekannten Anwendungen wie z.B. bei der Sicherheits- und Verkehrsüberwachung oder auch dem Design autonomer Roboter oder Fahrzeuge ist sie ein relevanter Vorgang für die angestrebten videobasierten Untersuchungen von Reibmaterialien. [55], [62], [63]

In [62] und [69] werden Möglichkeiten der **Bildvorverarbeitung** vorgestellt, wobei sich hier der Fokus auf Grauwertbilder richtet. Auch [65] bezieht sich auf Grauwertbilder und beschreibt diese als eine diskrete Grauwertmenge G , welche nach Abtastung und Quantisierung entsteht. Jene Grauwertmenge (meist 256 Grauwerte) charakterisiert die Detailtiefe des Bildes, welches sich generell als Matrix von Bildpunkten (anzusprechen über Zeile und Spalte) beschreiben läßt. Gleiches gilt für Farbbilder, die als Mehrkanalbild charakterisiert werden können. Klassische RGB-Bilder besitzen demnach drei Kanäle, welche man ebenfalls als Grauwertbilder speichern und verarbeiten kann. Die Grauwertverteilung wird als Schwankungsgröße aufgefaßt, die in Abhängigkeit vom Ort innerhalb eines definierten Grauwertintervalls Werte annimmt. Liegen gleichmäßig graue

Flächen vor, spricht man von Rauschfreiheit. Umgekehrt bedeuten viele Details und Grauwertvariationen einen hohen Rauschanteil.

Sinnvoll ist die Vorverarbeitung mittels statistischer Kenngrößen, wie z.B. statistische Momente. Dabei stellt der Mittelwert das statistische Moment erster Ordnung dar, was gleichzeitig einem Maß für die Helligkeit in einem Bild entspricht. Die Varianz bedeutet das statistische Moment zweiter Ordnung, liefert Kontrastinformationen und ist auch als mittlere quadratische Abweichung der Grauwertverteilung bekannt. Scharfe Bilder besitzen meist einen größeren Kontrast und demnach auch eine größere quadratische Abweichung.

Die Nutzung von Histogrammen ist laut [65] eine weitere Möglichkeit der Vorverarbeitung mittels statistischer Kenngrößen. Sie stellen die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte in einem Bild dar und liefern Aussagen zu Belichtung, Kontrast oder auch Bilddynamik. Nicht gleichverteilte Grauwerte liefern Aussagen zu Grauwertschwellen, die für die Binarisierung genutzt werden, wobei lokale Minima Hinweise für optimale Schwellwertpositionen sind. Mittels der Summenhäufigkeit erhält man kumulierte Histogramme, die sowohl eine Relativierung als auch eine Normierung darstellen.

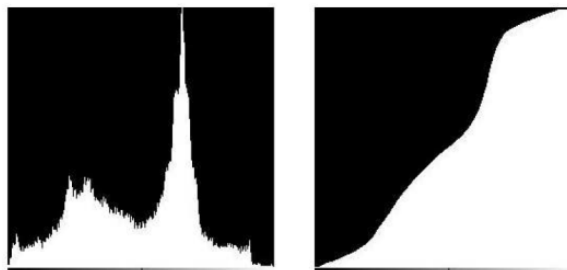


Abb. 3.25: Histogramm (links) und kumulatives Histogramm (rechts) nach [65]

Die Nutzung von Histogrammen ist besonders gut geeignet bei kontrastschwachen Bildern. Hierbei werden dicht zusammenliegende Grauwerte gleichmäßig auf dem Intervall (z.B. 256 Werte) verteilt.

Die Binarisierung ist ebenfalls als Bestandteil der Bildvorverarbeitung zu verstehen. Sie wird durch die Festlegung einer Grauwertschwelle, unterhalb derer der Wert 0 vergeben wird, umgesetzt (Abb. 3.26).

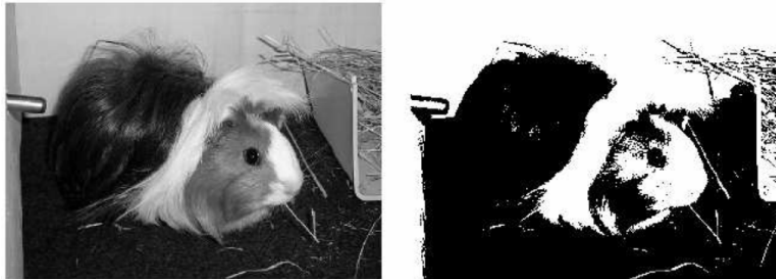


Abb. 3.26: Originalbild (links) sowie binarisiertes Bild (rechts), [65]

Im weiteren können arithmetische Operationen wie Addition, Subtraktion, Multiplikation oder Division angewendet werden, was jedoch bildpunktweise erfolgt. Auch sind logische Operationen, Falschfarbendarstellungen, Invertierungen oder Labeling denkbar. [65]

Im Rahmen der **Segmentierung** erfolgt laut [55] eine Extraktion aller zusammenhängenden Bereiche aus einem Bild. Eine Segmentierung bzw. Untergliederung in Szenen ist demnach nicht gemeint. Die Untergliederung eines Urbildes in Teilbereiche mit gleicher Eigenschaft erfolgt meist mit Methoden der Flächen- oder Kantendetektion, wie [62] schreibt.

Demnach kann sich die Segmentierung an Histogrammen orientieren. Man nutzt Schwellwerte, so daß schnell und einfach segmentiert werden kann, ein Beispiel hierfür ist in Abb. 3.27 dargestellt.

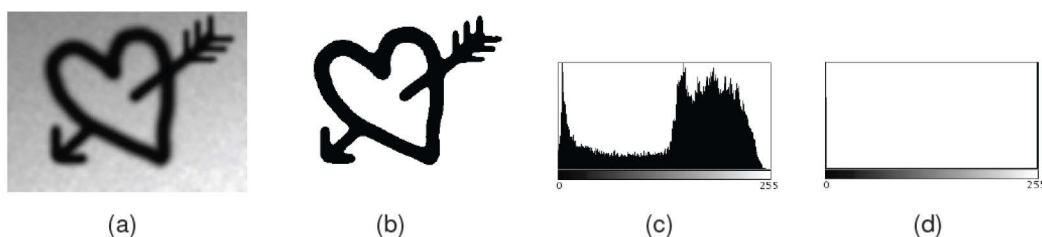


Abb. 3.27: Darstellung der Segmentierung (b) eines Urbildes (a) sowie des ursprünglichen Histogramms (c) und des Histogramms des segmentierten Bildes (d), [55]

Auch eine Unterteilung bzw. Segmentierung nach Farbbereichen ist möglich, gut geeignet ist hierfür der HSI-Farbraum (engl.: **H**ue **S**aturation **I**ntensity). Dieser ist auch als HSV (engl.: **H**ue **S**aturation **V**alue) oder HSB (engl.: **H**ue **S**aturation **B**rightness) bekannt und beschreibt den Farbton, die Sättigung sowie die Helligkeit. Jedes der Merkmale des Farbraums wird mittels Grauwerten in einem eigenen Bild codiert und Schwellwerte gesetzt. Auf diese Weise ist eine Segmentierung nach Farben realisierbar.

Eine weitere Möglichkeit der Segmentierung ist die Nutzung von Mustern, die sich besonders bei schnellen Grauwertschwankungen oder der Wiederholung von gleichen oder ähnlichen Strukturen anbietet. Auch mit Hilfe der Kantendetektion kann segmentiert werden, da die detektierten Kanten oft den Konturen bzw. Grenzen der Objekte entsprechen. Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß mittels der Schwellwertverfahren die Flächen der Objekte extrahiert werden, mittels der Kantendetektionsverfahren indes die Umrisse. [62], [65]

Mit Hilfe der **Merkmalsextraktion** lassen sich bestimmte Merkmale wie Farbe, Größe oder Konturform extrahieren. Dabei geht es darum, Merkmale zu charakterisieren und Objekte voneinander zu unterscheiden. Zu diesen Merkmalen zählt man den mittleren Grauwert, der gebildet wird, wenn eine Objektausdehnung vorliegt. Ebenso kann man den Flächeninhalt berücksichtigen, der sich aus der Anzahl der Bildpunkte bestimmt, wie auch den Schwerpunkt (bei binären Bildern), welcher der Näherung des Mittelwertes der Koordinaten der Objekt-Bildpunkte entspricht. Auch die Bestimmung des Umfangs (über die Ermittlung der Anzahl der Randpunkte) und eines umschreibenden Rechtecks (bezogen auf ein Bildobjekt), bei dem der Flächeninhalt zu minimieren ist, können genutzt werden. Weitere Merkmale wie die Kompaktheit K , der polare Abstand oder auch die Lage bzw. Orientierung eines Bildobjektes können aus diesen abgeleitet werden. Die Extraktion selbst kann durch die Nutzung von Histogrammen erfolgen, wie sie bereits für die Segmentierung vorgestellt wurden. Eine weitere Möglichkeit der Extraktion ist die Kantendetektion, wobei auch hier die

Grauwerte die Basis bilden. Zwischen den Rändern eines Objektes und dem Hintergrund entstehen meist deutliche Helligkeitsunterschiede, welche sich in abrupten Änderungen der Grauwerte äußern. Eine Kante kann demnach als Diskontinuität im Verlauf der Intensitätswerte definiert werden. [55], [62], [65]

Verschiedene Kantenoperatoren existieren und werden von [55], [57] und [62] vorgestellt. Als eine Gruppe werden dabei die Sobel-, Roberts- und Prewitt-Filter zusammengefaßt. Sie stellen einfache lokale Operatoren dar und werden nur auf kleine Ausschnitte, nicht das komplette Bild angewendet. Diese Ausschnitte werden später zusammengesetzt. Grundsätzlich besitzen sie ähnliche Algorithmen, jedoch verschiedene Operatoren.

Ergänzend führt [65] aus, daß Filter, die benachbarte Pixel berücksichtigen, robuster sind, besonders gegen Rauschen.

Die **Objektrepräsentation** ist ein weiterer relevanter Schritt der Objekterkennung und notwendig, um zu definieren, wonach man im Bild suchen muß. Die Repräsentationsform nutzt die bereits genannten Merkmale, wobei jedoch verschiedene Repräsentationsarten möglich sind. Die einfachste Variante bezieht sich auf Punktrepräsentationen, die für kleine Objekte sehr gut geeignet sind. Insbesondere für die Partikeldetektion ist sie interessant, bei der die Partikel durch einen einzigen Punkt sehr gut abgebildet werden können. Daneben ist die Nutzung primitiver Grundformen wie z.B. Dreiecke, Rechtecke, Ellipsen usw. gut für einfache, starre Objekte geeignet. Auch mittels Konturen lassen sich Objekte repräsentieren. Die Beschreibung über die Umrisse wird häufig für komplexe, dynamische Objekte verwendet.

Sind Form und Größe im Vorfeld ungefähr bekannt, kann ein Modell erstellt und zur Objektrepräsentation genutzt werden. Dieses Modell ist eine Vorlage, anhand derer die Bildsegmente verglichen werden. Zumeist modelliert man Drahtgittermodelle, welche sich für starre Objekte, die ihre Form nicht verändern, anbieten. Als wichtiger Vertreter gilt die Hintergrundmodellbildung, welche [63] näher beschreibt. Die Erstellung eines Hintergrundmodells kann helfen, Veränderungen

(Objektbewegungen) zu detektieren. Dabei soll jedoch der Hintergrund stationär sein (Abb. 3.28)

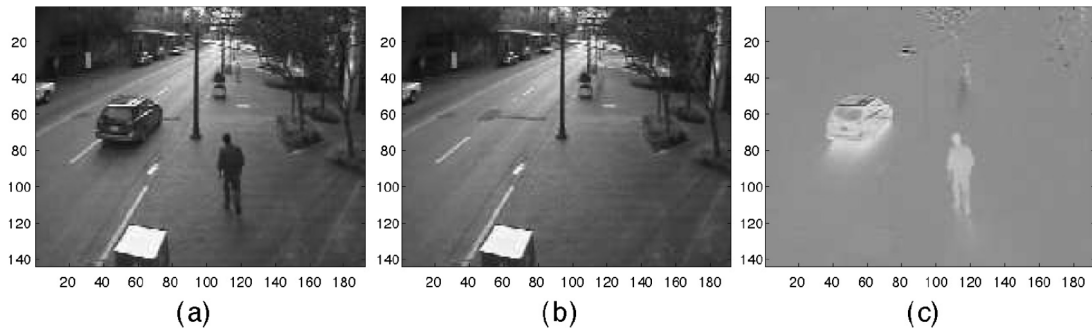


Abb. 3.28: Beispiel eines Hintergrundmodells bzw. Hintergrundsubtraktion, nach [63]

Neben der reinen Analyse der farb- bzw. grauwertbasierten Informationen können auch räumliche Szeneninformationen genutzt werden. Somit lassen sich bei Anwendung auf das jeweilige Pixel plus Nachbarpixel auch Kamera-Jitter bzw. geringe Hintergrundbewegungen berücksichtigen. [55], [63]

3.6.3 Bildverarbeitende Objektverfolgung

Die Möglichkeit, Objekte zu verfolgen, ist ein bedeutsames Gebiet der Bildverarbeitung und ist mit der Bewegungskdetektion, dem Erkennen von Bewegung(en) in einer Bildsequenz, eng verbunden. Laut [68] gilt die Annahme, daß die Bewegung einem Wechsel der Grauwertintensitäten der Pixel entspricht. Dabei bedeutet der Wechsel der Grauwerte jedoch nicht zwingend eine Bewegung, da inhomogene Beleuchtung sowie Rauschen dies ebenso bewirken können. Die Tracking-Algorithmen sind gemäß der Anwendung auszuwählen und orientieren sich an Kontrastverhältnis, Auflösung und dem Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: SNR = signal-to-noise-ratio). Unterschieden wird die Bewegungskdetektion in die objektabhängige und –unabhängige Detektion. Bei der objektunabhängigen Detektion werden jegliche Bewegungen in einer Sequenz erkannt, wobei die Kamera eine feste Perspektive hat. Es erfolgt keine Objektsegmentierung im Bild, sondern lediglich ein Vergleich aller Pixel des Bildes. Als Ergebnis steht ein Binärbild, bei dem die Farbe Weiß den Bereichen mit Bewegung, die Farbe Schwarz den statischen Bereichen zugeordnet ist. Die objektabhängige

Detektion berücksichtigt die Extraktion von Objekten anhand bildinterner Merkmale, sogenannter Features wie zum Beispiel Kanten oder Ecken. Das Objekt wird durch die Sequenz verfolgt, womit man seine Bewegung erhält. Man sucht dabei die Korrespondenz eines Pixelpaares in zwei aufeinanderfolgenden Bildern, wobei nicht der komplette Bildinhalt betrachtet wird, sondern nur Teile von ihm. Dies hat den Vorteil, daß auch mehrere Objekte detektiert werden, auch mit voneinander unabhängigen Bewegungen.

Ferner führt [68] aus, daß die Detektionsalgorithmen sehr sensitiv gegenüber Beleuchtungs-inhomogenitäten und Rauschen sind, so daß eine Vorverarbeitung nötig ist. Hierfür kann man Rauschfilter wie Gauss- oder Medianfilter nutzen. Eine Verbesserung des Kontrastverhältnisses kann durch eine Histogrammlinearisation erzielt werden, was gleichzeitig ebenso Beleuchtungs-inhomogenitäten eliminiert. Als weitere Möglichkeit, Rauschen zu verringern, wird das Thresholding (Binarisierung) genannt, welches besonders dann interessant ist, wenn geringe Unterschiede in den Grauwertintensitäten vorliegen. Jedoch ist die Anpassung des Schwellwertes sehr wichtig, da sonst die Ergebnisse verfälscht werden können.

Ergänzend definieren [55] und [63] das Tracking als ein Verfolgen bewegter Objekte unter Abschätzung ihrer Objekttrajektorie in der Bildebene für einzelne Bilder einer Videosequenz. Dabei beschreiben sie vornehmlich die Probleme, welche das Verfolgen begleiten. Hierzu zählen der Informationsverlust durch die Projektion der 3D Realität in 2D Bildebene, das Bildrauschen und ebenso komplexe Objektbewegungen. Auch Verdeckungen (partiell oder komplett), komplexe Objektformen oder wechselnde Beleuchtungsverhältnisse erschweren das Tracking. Wichtig ist zudem zu erwähnen, daß nahezu alle Algorithmen von gleichmäßigen Bewegungen, nicht von abrupten, ausgehen.

Die Trackinggenauigkeit wird auch von [66] betrachtet. Sie kann demnach durch drei Hauptfaktoren beeinflusst werden: der verwendeten Kamera bzw. Mikroskop, dem Rauscheinfluß sowie dem genutzten Tracking-Algorithmus. Das Rauschen (engl.: noise) kann mehrere Ursachen haben.

Hierzu zählt das Rauschen der Kamera bzw. des Kamerachips (engl.: shot noise), welches verursacht wird durch das Auftreffen von Photoelektronen auf der Chip-Oberfläche und unvermeidlich ist. Auch mögliche Bildschwankungen (engl.: jitter) durch mechanisches und elektronisches Rauschen, sowie Artefakte, die durch die Videokompression erzeugt werden, entsprechen einem erhöhten Rauschanteil. Als Kriterium der Trackinganalyse wird der mittlere Radiusfehler (engl.: mean radial error) eingeführt. Hohe Werte entsprechen hierbei einer geringeren Genauigkeit. Ebenso wird das SNR als wichtiges Kriterium genannt, welches mindestens zwischen vier und neun liegen sollte, um über ein verwertbares Nutzsignal zu verfügen. Auch wurde untersucht, inwieweit die Videokompression Einflüsse auf die Trackingqualität hat. Der Autor schreibt, daß nur geringe Einflüsse bestehen und der shot noise weitaus größeren Einfluß besitzt. Der Einflußfaktor Kamera bzw. Mikroskop ist auf Vergrößerungseffekte und numerische Apertureffekte zu beziehen. Wird die Auflösung geringer, erscheinen die Objekte kleiner, was dazu führen kann, daß nur ein Teil der Objekte detektiert wird. Zwar sollte demnach die höchste Vergrößerung genutzt werden, jedoch ist dabei auch zu berücksichtigen, daß sich dadurch mitunter der Rauschanteil, durch ein sinkendes Helligkeitsniveau aufgrund der verbesserten Vergrößerung, erhöht. Demnach ergibt sich eine praktische Grenze der Vergrößerung von 30 bis 40 nm/Pixel. Daneben beeinflusst die Apertur des verwendeten Objektivs die Bildaufnahme, obgleich Untersuchungen gezeigt haben, daß die Numerische Apertur keinen nennenswerten Einfluß auf Rauschverhalten hat.

Nach [55] werden folgende 4 Methodenklassen für die Objektverfolgung unterschieden. Im Rahmen der **merkmalbasierten Methoden** werden im ersten Schritt durch die Segmentierung beliebige Bildelemente extrahiert. Im zweiten Schritt werden die Bildelemente zu Merkmalen (Farbe, Gerade, Ecke usw.) zusammengefaßt, so daß sich eine Bild-zu-Bild Merkmalszuordnung anschließt. Hinsichtlich der Kanten führt der Autor aus, daß eine Objektbegrenzung i.d.R. einen deutlichen Wechsel der

Bildintensitäten bedeutet. Daher sind Kanten einfach zu detektieren, auch weil sie weniger empfindlich gegenüber Beleuchtungsschwankungen sind. Algorithmen, die die Objektbegrenzung tracken, nutzen meist die Kantenerkennung, deren einfachster Algorithmus der Canny-Kantendetektor ist. Auch der optische Fluß kann als Merkmal dienen. Er repräsentiert ein Dichtefeld von Verschiebungsvektoren, welches die Übertragung jedes Pixels in eine Region definiert und Helligkeitswerte nutzt. Dabei werden Pixel mit konstanter Helligkeit in aufeinanderfolgenden Pixeln gesucht. Das Merkmal Textur berücksichtigt Intensitätsvariationen der Oberfläche und quantifiziert Merkmale wie die Gleichmäßigkeit und Regelmäßigkeit.

Meistens werden die Merkmale manuell durch den Nutzer gewählt, dennoch gibt es auch automatische „Merkmalswähler“ wie Filtermethoden oder Umhüllungsmethoden (engl.: wrapper methods). Die Filtermethoden wählen die Merkmale nach einem globalen Aspekt, wohingegen die wrapper methods die Merkmale nach der Nutzbarkeit in Bezug auf ein spezifisches Problem auswählen.

Eine weitere Methodenklasse stellen die **regionenbasierten Methoden** dar. Sie sind recht simpel, schnell und weitverbreitet. Mittels geeigneter Merkmale werden zusammenhängende Regionen durch primitive Formen (engl.: primitives) wie Rechtecke oder Ellipsen dargestellt. Meist sind sie auf feststehende Kameras beschränkt.

Die **konturbasierten Methoden** indes sind gut für komplexe und dynamische Objekte geeignet, wobei diese durch ihre Umrisse repräsentiert werden. Geänderte, neue Konturen werden mit Hilfe der alten (aus dem Vorgängerbild) gefunden, so daß sich eine ständige Aktualisierung ergibt, die zudem recht unempfindlich gegen Rauschen ist.

Im Rahmen der **modellbasierten Methoden** wird im Bild nach zuvor definierten Modellen gesucht. Sie sind gut geeignet für einfache, starre, wie auch komplexe und dynamische Objekte.

Die erforderlichen **Algorithmen zur Bewegungskdetektion und Objektverfolgung** stellen [63] und [67] vor. Der sogenannte Punktverfolger (engl.: point tracker) dient meist der Erfassung und Analyse menschlicher

Bewegungen, wobei die Objekte in aufeinanderfolgenden Frames durch Punkte repräsentiert werden. Will man größere Objekte erfassen, müssen multiple points genutzt werden. Dies erfordert eine automatische Clusterung. Kritisch ist dann die Erfassung des Objekts in Verbindung mit der Unterscheidung vom Bildhintergrund.

Mit Hilfe des Kernel-Trackings können Objektformen und –erscheinungen verfolgt werden. Hierbei wird eine einfache Objektregion (engl.: primitive object region) für aufeinanderfolgende Frames untersucht. Es können Templates genutzt werden, welche das Objekt repräsentieren und nach denen das Bild untersucht wird, oder (farbige) Histogramme. Beides kann auch kombiniert werden, indem man z.B. einen mittleren Farbwert (aus dem Histogramm) in einer rechteckigen Objektregion (Rechteck ist das Primitive) sucht. Kritisch ist anzumerken, daß Teile des Objekts aus dem Template (der sogenannten primitive geometry) herausragen und Teile des Hintergrunds in das Objekt hineinragen (gilt für starre und deformierbare Objekte) können, so daß falsche Bewegungsparameter geschätzt werden.

Im Rahmen des Silhouette-Trackings werden Kantenkarten (engl.: edge maps) zur Detektion der Silhouette (Form, Kontur) innerhalb einer zuvor im Frame definierten Region genutzt. Gedacht ist dies für komplexe Formen, die nicht mit Primitives beschrieben werden können (z.B. menschliche Körperteile). Es liefert eine akkurate Gestaltbeschreibung anhand von (Farb-) Histogrammen, Objektkanten oder –konturen.

Daneben können auch laut [56] und [65] statistische Methoden wie Kalman- und Partikelfilter als Verfolgungsalgorithmen betrachtet werden, die zumeist auf modellbasierte Methoden angewendet werden. Der Kalman-Filter ist der beste Ansatz für einfache Modelle, der Partikel-Filter, welcher auch als Condensation Algorithm bekannt ist, wird auf Videos mit nicht-linearen Bewegungen angewendet. Als Partikel werden dabei Samples, also Einzelbilder, bezeichnet. Ziel ist die Abschätzung bzw. Prädiktion des Bewegungsverhaltens bzw. der nächsten Position mittels eines objektspezifischen Bewegungsmodells, wobei nicht das komplette Bild, sondern lediglich ein Ausschnitt (engl.: region of interest = ROI) betrachtet wird.

3.6.4 Bewegungsanalyse

Die sich anschließende Bewegungsanalyse bestimmt aus den zuvor ermittelten Weg-Zeit-Verläufen das Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungsverhalten. Somit ist die Grundlage für weitergehende statistische und klassifizierende Methoden zur Bewegungsinterpretation gegeben.

In [61] werden detaillierte Ausführungen zur Bestimmung der Geschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen gemacht (Abb. 3.29).

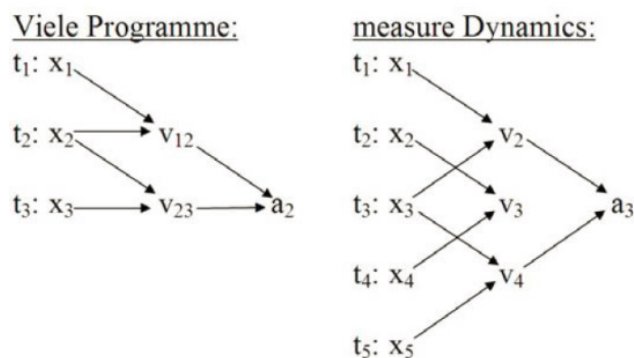


Abb. 3.29: Berechnung von Geschwindigkeit und Beschleunigung durch Differenzbildung, nach [61]

Die meisten Programme berechnen die Geschwindigkeit v und weisen sie dem zweiten Ortswert zu, was dem Ende statt der Intervallmitte entspricht. Dies gilt analog ebenso für Beschleunigungen. Da man die Werte zweimal um den halben Zeitintervall $dt/2$ zu spät zuweist, ergibt sich ein Verzug um einen kompletten Zeitintervall dt für die Beschleunigung.

Das hier näher betrachtete Programm *measure Dynamics* indes ermittelt v aus den Werten für x_1 (der Index bezeichnet dabei jeweils die Nummer des Frames) und x_3 und weist es dann x_2 zu! Zwar bedeutet dies, daß die Mittelung über ein größeres Intervall erfolgt, jedoch wird dieser Nachteil durch die höhere Genauigkeit kompensiert.

Nach [59] ist die Bewegungssegmentierung die Vorstufe der Bewegungsinterpretation und erste Qualifizierungsstufe. Vorgestellt werden zwei Konzepte (Abb. 3.30), die auch in [64] zu finden sind. Die schwellwertbasierte Segmentierung berücksichtigt immer dann ein neues Intervall, wenn der Unterschied eines aktuellen Wertes größer als ein bestimmter Schwellwert in Bezug auf den Mittelwert ist. Bei der

monotoniebasierten Segmentierung indes werden die Intervalle getrennt, wenn die Abschnitte monoton steigend, fallend oder konstant sind.

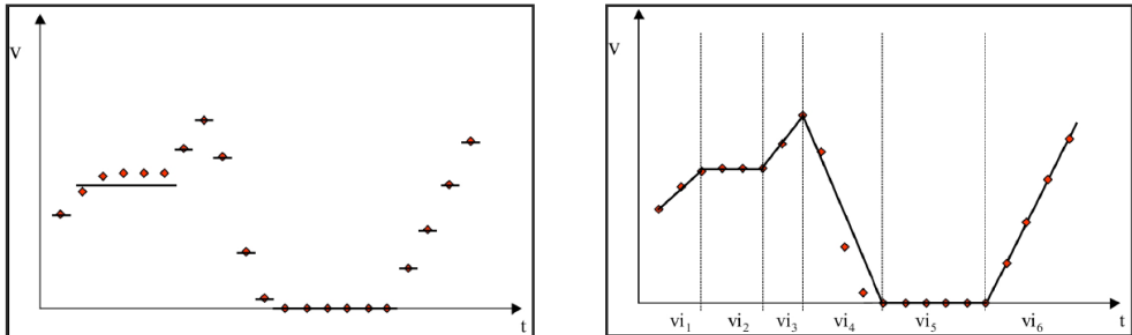


Abb. 3.30: Schwellwert- (links) und monotoniebasierte (rechts) Segmentierung , nach [59]

Interessant ist dabei, daß beide Konzepte ineinander greifen, da die monotoniebasierte Segmentierung der Geschwindigkeit gleich der schwellwertbasierten Segmentierung der Beschleunigung ist.

Zusammenfassend wird festgehalten, daß sich die Anwendung der digitalen Bildverarbeitung und Bewegungs- und Ausdehnungsanalyse auf die Charakterisierung des Reibverhaltens aktuell auf einzelne Bildaufnahmen von zumeist ex-situ Ansätzen beschränkt. Für dynamische in-situ Videoaufnahmen tribologischer Vorgänge hinsichtlich der Analyse des Partikel- und Patchverhaltens sind keine Vorarbeiten bekannt.

3.6.5 Bewegungsparameter und statistische Analysen

Die auf diese Art und Weise ermittelten Bewegungsdaten in Form von Weg-Zeit und Geschwindigkeit-Zeit Diagrammen sollen so aufbereitet werden, daß die relevanten Bewegungsparameter extrahiert werden und statistische Analysen und Auswertungen erfolgen können.

Hierfür bedient man sich üblicherweise der Werkzeuge der Signalanalyse bzw. der statistischen Auswertungen, von denen einige an dieser Stelle kurz vorgestellt werden sollen. Die Extraktion des Maximalwertes ist eine Möglichkeit, ein Zeitsignal auf einen skalaren Wert zu reduzieren. Besonders beliebt und zumeist aussagekräftiger ist die Bestimmung von Mittelwerten. Unterschieden wird u.a. durch Klein in den arithmetischen

Mittelwert, der auch das Moment erster Ordnung darstellt, sowie in den effektiven Mittelwert, der auch als Moment zweiter Ordnung oder Quadratischer Mittelwert bekannt ist. [70]..[74]

Ergänzend findet sich das zentrale Moment zweiter Ordnung, auch Varianz oder Streuung genannt. Es ist als Summe der Quadrate der Abweichungen der Einzelwerte vom arithmetischen Mittelwert zu verstehen, welche durch die Zahl der Freiheitsgrade dividiert wird. Zusammen mit der Standardabweichung, welche als positive quadratische Wurzel der Varianz definiert ist, bilden sie ein Maß für die Streuung um einen Mittelwert. [70].. [74]

Ein wichtiges Instrument aus der Signalanalyse ist der Crest- oder Scheitelfaktor. Er erlaubt Aussagen über die Spitzen- bzw. Impulshaltigkeit von Zeit-, aber auch Frequenzsignalen. Hohe Crest-Faktoren bedeuten eine hohe Impulshaltigkeit, wobei man beachten sollte, daß Werte im Bereich zwischen 5 und 10 auch rauschhaltige Signale beschreiben können. [74], [75]

Schließlich sei die mittlere spektrale Energie erwähnt, die das Flächenintegral der zu analysierenden Signalreihen darstellt und häufig einen guten Eindruck über den Charakter eines Signalverlaufs in Form eines Skalars erlaubt. [75]

Die jeweiligen Berechnungsvorschriften (Gleichungen (13.1) bis (13.6)) finden sich im Anhang (13.1.3).

Im weiteren werden die Signalauswertungen oftmals statistischen Analysen unterzogen, um Abhängigkeiten verschiedener Parameter oder Randbedingungen aufzuzeigen. Die Berücksichtigung von Histogrammen sieht die Sortierung der Daten nach Zahlenwerten oder Ausprägungen vor und berücksichtigt die Bestimmung der Häufigkeitsverteilung von verschiedenen Klassen. Zuvor ist demnach eine Klassifizierung notwendigerweise vorzunehmen. Die Dichtekurve stellt eine Approximation eines Histogramms dar, die im Idealfall als Normalverteilung vorliegt, welche als symmetrisch, unimodal oder auch glockenförmig

beschrieben werden kann. Als Basis für Histogramme bzw. Dichtekurven sind Skalen zu nennen. Die Ordinalskala berücksichtigt dabei verschiedene Klassen, die in Abhängigkeit ihrer Werte abgetragen werden, wobei sich die Rangfolge der Klassen an ihren Werten bzw. Ausprägungen orientiert. Für die Intervalskala erfolgt indes eine Einteilung der Klassen anhand fester Intervallgrenzen, während bei der Verhältnisskala die Klassen ebenso festen Intervallgrenzen unterliegen, ihre Werte bzw. Ausprägungen sich jedoch an einem absoluten Bezugswert (Nullpunkt) orientieren. [76], [77]

Für die Histogramme bzw. Dichtekurven ist zudem eine Charakterisierung der Verteilungsformen möglich. Stimmt der arithmetische Mittelwert mit dem Median überein, so spricht man von einer symmetrischen Verteilung. Liegt er unter oder über dem Median, liegt eine rechtsseitige bzw. linksseitige Verteilung vor. Alternativ kann auch die Schiefe (statistisches Moment dritter Ordnung) ermittelt werden, um zu ermitteln, ob symmetrische, linkssteile oder rechtssteile Verteilungen vorliegen. Auch die Bestimmung der Wölbung (Kurtosis), dem statistischen Moment vierter Ordnung, kann eine weiterführende Auskunft über die Verteilung gegeben werden, da mit seiner Hilfe der Exzess ermittelt werden kann. Nimmt er den Wert Null an, liegt eine Normalverteilung vor, während spitzere Verteilungen Werte größer Null und flachere Verteilungen Werte kleiner Null bedeuten. Der Exzess ist damit ein wichtiges Werkzeug, um die Verteilungsbreite zu charakterisieren. [74], [75], [76], [77]

Um prinzipiell zu prüfen, ob überhaupt eine Standardnormalverteilung vorliegt, kann sich zum Beispiel dem Chi-Quadrat oder dem Shapiro-Wilk Test bedient werden. Letzterer besitzt eine höhere Güte. Im Ergebnis wird entweder die Normalverteilung bestätigt, oder eine Verschiebung angezeigt. Auch können sich bi- oder multimodale Verteilungen erkennen lassen.

Soll ermittelt werden, ob Parametersätze gesetzmäßig miteinander verknüpft sind, sind Korrelationsrechnungen ein wichtiges Instrument. Erwähnt werden soll der Bravais-Pearson Korrelationskoeffizient, welcher

mindestens eine Intervallskala erfordert, und der im Ergebnis gleichsinnige bzw. gegensinnige lineare Zusammenhänge bei positiver bzw. negativer Korrelation oder einen unkorrelierten Zusammenhang aufzeigt. Auch kann auf den Spearmans Rangkorrelationskoeffizient zurückgegriffen werden, wenn mindestens eine Ordinalskala vorliegt. Für ihn bedeutet eine positive oder negative Korrelation, daß ein gleichsinniger bzw. gegensinniger monotoner Zusammenhang besteht oder, daß kein monotoner Zusammenhang vorliegt (keine Korrelation). [76], [77]

4 Forschungsbedarfe

Die erkannten Forschungsbedarfe ergeben sich aus dem Abgleich der formulierten wissenschaftlichen Ziele mit dem Stand der Technik.

Im Bereich der **Reibmechanismen** ist Musiol zu keinen Aussagen der dynamischen Veränderlichkeit der Belagoberflächentopographie gelangt. Ebenso gibt es nur pauschale Angaben des Verhältnisses von realen zu nominellen Flächenpressungsverhältnissen, konkrete Quantifizierungen sind anzustreben. Daneben wurde gezeigt, daß die Reibschicht nur begrenzte mechanische Festigkeiten besitzt. Das Lösen der Bremse und der Ausbau der Beläge kann diese bereits zerstören, mindestens aber verändern, was den Bedarf an in-situ Untersuchungen verdeutlicht. Auch entspricht das untersuchte System dem einer Industriebremse, nicht jedoch einer Radbremse für Pkw (Vollbelagreibpaarung statt Teilbelagbremssystem). Daher sind die festgestellten Erkenntnisse für diese Art von Reibsystem zu validieren.

Die Gruppe um Professor Jacobson hat zwar bereits in-situ Untersuchungen umsetzen können, jedoch sind die experimentellen Rand- und Rahmenbedingungen zum Teil sehr stark vereinfacht, Optimierungen hinsichtlich der Betriebsparameter und erzielten Genauigkeiten sind erforderlich. Es wurden zum Beispiel lediglich zugeschnittene Belagproben für pin-on-disc Versuche verwendet. Eine Unterscheidung des Belages hinsichtlich seiner radialen und tangentialen Ausdehnung ist demnach nicht möglich. Auch die erreichten maximalen Reibtemperaturen von 40°C sind ein Ansatzpunkt für Verbesserungen. Ebenso gilt es, die Bildqualität sowie die Bildausschnitte (lediglich ca. 700 x 500 µm) zu verbessern. Zwar wurden bereits Betrachtungen zum Nässeinfluß (unter Nutzung von Ethanol) vorgenommen, wobei eine erhöhte Partikelagglomeration festgestellt wurde. Jedoch erfolgten keine quantitativen Aussagen, auch in Bezug auf das zeitliche (dynamische) Verhalten nicht. Der Einfluß größerer Flüssigkeitsmengen (sowie die Berücksichtigung in der Realität vorkommender Flüssigkeiten wie z.B. Regenwasser) wird nicht betrachtet.

Interessant ist ebenso das Verhalten nach erfolgten Flüssigkeitsangriffen. Die Dynamik der Rekuperation bzw. Erholung der Reibschicht gilt es zudem zu ermitteln. Die Gruppe stellte fest, daß sich Partikel durch Kanäle bewegen oder (Sekundär-)Plateaus bilden. Konkrete Aussagen zur Partikeldynamik erfolgen jedoch nicht und sind zu erarbeiten. Auch Verlagerungen der tragenden Bereiche bzw. Reibringe werden nicht diskutiert, was auch mit dem vereinfachten Prüfling zusammenhängen mag. Die Vermessung der sich einstellenden Patches während der Bremsung (inkl. des dynamischen bzw. zeitlichen Bezugs) erfolgte nicht und soll nun untersucht werden. Schließlich wurde die Übertragbarkeit der Glasversuche auf konventionelle Reibsysteme kaum diskutiert bzw. belegt, was mit der vorliegenden Arbeit erfolgen soll.

Die Arbeiten der Gruppe um Professor Ostermeyer sehen SiO_2 (Quartz) als Keim der Patchbildung und modellieren darauf aufbauend das Reibverhalten. Nicht alle Belagrezepturen verfügen jedoch über solche ausgeprägten Initialkeime wie Quartz oder auch Eisenspäne. Eine in-situ Betrachtung aktueller Reibmaterialien wird daher zu Zwecken der Validierung der bestehenden Modelle angestrebt. Obgleich die Simulationsmodelle auch Verschleißpartikelströme berücksichtigen, sind keine Aussagen zu Größen- und Geschwindigkeitsverteilungen bekannt. Mindestens eine Validierung des simulierten Partikelverhaltens sollte anhand von in-situ Betrachtungen möglich werden. Ähnliches gilt für Aussagen zur Patchdynamik im Sinne ihrer Ausdehnungen im zeitlichen Bezug. Ein Abgleich bzw. eine Validierung erscheint sinnvoll. Bisherige Modelle beziehen sich auf einen repräsentativen Belagausschnitt. Da eine Unterscheidung zwischen tangentialer und radialer Ausdehnung erstrebenswert erscheint, können in-situ Untersuchungen solch erweiterte Modelle validieren. Ebenso widmet sich die Gruppe um Professor Ostermeyer sehr umfangreich Betrachtungen zum Schwingungsverhalten und instabilen Reibzuständen, wobei besonders die Synchronisierung von

Patches angesprochen wird. Hochdynamische in-situ Visualisierungen könnten solche Modelle zukünftig im Experiment bestätigen.

In Bezug auf **thermoelastische Instabilitäten** (TEI) ist festzuhalten, daß Phänomene wie Hot Banding oder Hot Spots stets auf den Reibring bezogen und für diesen beschrieben werden. Untersuchungen der Reibzone bzw. der Belagoberfläche insbesondere in-situ blieben bislang aus. Doch gerade die Antwort auf die Frage, was in der Reibzone vorgeht, ist von großer Bedeutung, um die wahren Triggermechanismen der TEI erkennen zu können. Auch bestehen kaum dezidierte Aussagen hinsichtlich der Dynamik der TEI, obgleich die Gruppe um Professor Ostermeyer simulativ ermittelt hat, daß sich Verlagerungen innerhalb von 40 s ereignen können (auf dem Reibring). Sollen solche Aussagen experimentell und in-situ bestätigt werden, ist jedoch auch die Validierung der Modellhaftigkeit vorzunehmen, um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse der Glasversuche auf Grauguß-Scheiben sicherzustellen. Dies ist insofern bedeutsam, da bisherige Ansätze aus Uppsala lediglich Temperaturen bis 40°C zuließen und demnach nicht einfach auf TEI-Phänomene übertragen werden dürfen. Interessant sind ebenso die Arbeiten von Bode zum thermischen Verhalten des Reibbelages. Der in der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde in-situ Ansatz soll die Messung des thermischen Verhaltens der Paarung organischer Reibbelag – Glas erlauben. Eine Simulation dieser Reibpaarung ermöglicht dann im weiteren einen Abgleich der Ergebnisse bzw. Validierung des kompletten Simulationsmodells. Das so validierte Modell kann anschließend für Reibpaarungen mit Grauguß- oder C/SiC Bremscheiben experimentell validierte Ergebnisse liefern. Wichtige Aussagen zur Dynamik der TEI, mindestens hinsichtlich des qualitativen Verhaltens, haben Dörsch und Kleinlein unter Professor Severin (TU Berlin) geliefert. Die festgestellten periodischen Temperaturschwingungen wurden jedoch für Kupplungsreibpaarungen (= Vollbelag) bzw. Industriebremsen beobachtet. Die Frage der Übertragbarkeit auf Teilbelagbremsen ist ebenso

zu klären wie die, ob Momentenschwankungen auch Reibwertschwankungen bedeuten und der mittlere Reibradius variiert.

Die zu entwickelnde in-situ Visualisierungsmethode muß daher die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf konventionelle Reibpaarungen ebenso gewährleisten wie die Umsetzung realistischer Betriebsparameter und Bremsmodi. Zudem sind ausreichend hohe Bildqualitäten und Auflösungsgenauigkeiten gefordert, um Analysen im Mikrometerbereich umsetzen zu können.

Im Bereich der **Oberflächenanalysen** (Belagphysik und -chemie) von Reibbelägen gibt es bereits umfängliche Arbeiten, besonders von der Gruppe um Dr. Österle (BAM), aber auch die Gruppen um Professor Jacobson (Uppsala), Professor Severin (TU Berlin) und Professor Ostermeyer (TU Braunschweig) waren und sind aktiv auf diesem Gebiet. Die Untersuchungen mittels REM, TEM, FIB oder EDX versuchen dabei zwar stets einen repräsentativen Bereich des Reibbelages zu betrachten, jedoch ist die Frage, was einen repräsentativen Bereich ausmacht, verschiedentlich definierbar. Daneben ist ebenfalls zu klären, welche Analyseeinstellungen vorzunehmen sind. Hierbei ist ein gelungener Kompromiß aus lokaler und globaler Aussage anzustreben. Zudem sei bemerkt, daß die Analysen sich stets auf einzelne Meßpunkte auf dem Reibbelag beziehen. Es erfolgt keine Rasterung oder ein Abscannen des Prüflings, so daß auch keine Aussagen zu Unterschieden hinsichtlich dem Belagein- und -auslauf sowie variierenden Reibradien gegeben werden können. Die vorliegende Arbeit soll diesen Beitrag liefern. Dabei müssen die Methoden die Analyse des kompletten Reibbelages sowie die Berücksichtigung von lokalen Unterschieden der Reibpartner erlauben. Auch sind eine ausreichend hohe Genauigkeit, die mindestens bis in den Mikrometerbereich reicht, sowie die Robustheit der chemischen Elementanalyse gegen dominante lokale Einflüsse, wie Materialanhäufungen, gefordert.

Die **Bewertung** und **Klassifizierung** von Partikeln, Patches, Porositäten und Hot Spots ist in der Vergangenheit bereits erfolgt. Die dynamische bzw.

zeitliche Komponente ist aufgrund der bisherigen ex-situ Betrachtungen jedoch kaum berücksichtigt oder validiert worden. Für die Betrachtung der Porositäten sind bis dato lediglich die Ausdehnungen ermittelt worden, ihre Lage im Reibbelag ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit ebenfalls zu bestimmen. Patches und Hot Spots werden aufgrund ihrer Abmessungen im zeitlichen Kontext zu charakterisieren sein, während die Partikel hingegen auch hinsichtlich ihrer Größenverteilung, den Stand- und Bewegungszeiten, den mittleren Geschwindigkeiten sowie den maximalen Geschwindigkeiten zu klassifizieren sind.

Da ein breites Spektrum an möglichen Betriebsparametern, welche im Rahmen der Arbeit durch entsprechende Prüfprozedere zu definieren sind, besteht, sind die genannten Anforderungsprofile der Untersuchungen und Analysen möglichst so umzusetzen, daß sie für alle Betriebsparameter Gültigkeit besitzen.

Die Analyse des **Kompressibilitätsverhaltens** ist Gegenstand zahlreicher kritischer Veröffentlichungen, welche in Kapitel 3.4 vorgestellt wurden. Nicht alle Aspekte sollen im Rahmen dieser Arbeit jedoch Berücksichtigung finden. Da das lokale, ortsaufgelöste Verhalten des Reibbelages eine zentrale Rolle für diese Arbeit spielt, soll der Nachteil der bisherigen globalen und integrativen Kompreßbestimmung aufgegriffen werden. Es wird als eine Bereicherung bisheriger Ansätze gesehen, eine lokale Kompressibilitätsmethode zu entwickeln. Die zu entwickelnde Methode hat eine große Robustheit und hohe Wiederholgenauigkeit der Prüfung zu gewährleisten, während sich die Prüfparameter an gängigen Standards (wie [37]) orientieren sollen. Hinsichtlich der lokalen Auflösung (Wahl der Meßstellen) ist festzuhalten, daß sie sich zu Zwecken der Vergleich- und Übertragbarkeit an der der in-situ Versuche sowie den chemischen und übrigen physikalischen Untersuchungen zu orientieren hat.

Auch die Bestimmung der **Porosität** von Reibbelägen wurde in der Vergangenheit von zahlreichen Forschern untersucht. Die in der Regel penetrierenden Methoden lassen jedoch Aussagen zur Verteilung der

Porosität nicht zu. Daher und aufgrund der Notwendigkeit der orts aufgelösten Belagcharakterisierung wird ein Bedarf an Methoden zur Bestimmung der dreidimensionalen Porenverteilung gesehen. Dies soll ebenfalls erlauben, mögliche Korrelationen zwischen Porosität und Kompressibilität aufzuzeigen, was bislang in Bezug auf lokale Unterschiede noch nicht erfolgt ist. Auch stellen gewonnene Porositätsverteilungen die Basis für Untersuchungen zum Einfluß physikalischer Eigenschaften auf das Reibverhalten dar. Die Analyse von Reibbelägen mittels Computertomographie ist eine neue Thematik und besonders speziell, weil die Beläge eine Vielzahl von Materialien, eine heterogene Struktur bzw. Verteilung der Materialien sowie anisotrope Materialeigenschaften aufweisen. Die Methode muß daher robust und wiederholgenau sein und hat sicherzustellen, daß keine Fehldetektionen auftreten.

Hinsichtlich der **Charakterisierungs- und Klassifizierungsmethoden** ist zunächst für die **bildverarbeitende Objekt- und Bewegungsanalyse** festzuhalten, daß es bereits verschiedene funktionierende Ansätze der Bildverarbeitung gibt, mit deren Hilfe die Charakterisierung von Partikeln, Patches, Porositäten und auch thermischen Phänomenen wie Hot Spots möglich ist. Ein Bedarf an der Entwicklung neuer Ansätze läßt sich aus der Literatur für die formulierte Zielstellung nicht ableiten, wohl aber die Notwendigkeit, die geeigneten Methoden und Werkzeuge zu identifizieren und aufzugreifen. Diese sind anschließend an die Aufgaben anzupassen, um ein Optimum hinsichtlich der Charakterisierung zu erzielen.

Bezogen auf die Partikelanalysen bedeutet dies, daß Strömungsanalysen (der Partikelströme) im Bereich der Fluidodynamik etabliert sind (u.a. in [85]). Für die Anwendung innerhalb der Reibzone ist diese Methode jedoch bislang nicht erprobt und muß daher auf ihre Tauglichkeit geprüft und gegebenenfalls angepaßt werden. Einzelpartikelanalysen in Form einer (automatisierten) Partikelverfolgung innerhalb der Reibzone sind bis dato nicht bekannt. Bestehende Ansätze der Partikeldetektion, -verfolgung, Bewegungsanalyse aus anderen wissenschaftlichen Anwendungsgebieten

sind daher aufzugreifen und zu adaptieren. Für die Analyseansätze sind hohe Genauigkeiten, die bis in den Nanometerbereich reichen, gefordert, um auch Kleinst- und Feinstpartikel berücksichtigen zu können.

Patches wurden in der Vergangenheit in- und ex-situ durch verschiedene Forschergruppen (Uppsala, BAM, IDS, TU Berlin u.a.) erkannt und teilweise auch vermessen. Dies erfolgte jedoch manuell und ohne zeitlichen Bezug, d.h. Informationen zur Patchdynamik. Somit ergibt sich ein Bedarf der Analyse von Dimension und zeitlichem Bezug, um das dynamische Verhalten zu ermitteln. Aufgrund der enormen Bilddatenmengen (durch hohe Bildabtastraten) ist eine automatisierte Bildverarbeitung notwendig. Diese muß sich auf die Patchdetektion ebenso beziehen wie auf die Patchanalyse. Neben der erforderlichen Genauigkeit, die in den Mikrometerbereich reichen sollte, wird von der Methode auch gefordert, daß sie aufgrund der großen Datenmengen hinsichtlich Analysezeit und –aufwand möglichst effektiv und effizient umgesetzt werden kann.

Für die Porositätsanalysen besteht neben dem Bedarf einer Optimierung der Methode zur Porenerkennung (unter Nutzung der CT-Rekonstruktionssoftware) ebenso ein Bedarf der Methodenentwicklung der Porenanalyse (mittels separater Bildverarbeitungssoftware). Auch für die Analyse von Hot Spots wird der Bedarf einer automatisierten Bildauswertung erkannt. Bislang gibt es keine dezidierte dynamische Charakterisierung von Hot Spots in der Reibzone. Aufgrund der Datenmengen ist es sinnvoll, die Dimensionen und das zeitliche Verhalten der Hot Spots automatisiert zu ermitteln.

Zur Bestimmung der **Bewegungsparameter** insbesondere der Abriebpartikel stehen verschiedene Werkzeuge aus der Signalbeurteilung und statistischen Versuchsauswertung hinsichtlich der Beurteilung der Zeitverläufe zur Verfügung. Diese sollen aufgegriffen werden und auf ihre Tauglichkeit hin überprüft werden, so daß gegebenenfalls Anpassungen vorgenommen oder auch neue Analyseansätze erarbeitet werden können.

5 Aufgabenpräzisierung

Aus der formulierten wissenschaftlichen Vision bzw. Zielstellung (**Kapitel 2**), dem Stand der Technik (**Kapitel 3**) sowie dem ermittelten Forschungsbedarf (**Kapitel 4**) und den zu deren Erfüllung vorgestellten Methoden leitet sich nun die **präzisierte Aufgabenstellung** ab, die zum einen die Abfolge der einzelnen Bearbeitungsschritte und zum anderen gleichzeitig die Teilmenge aller wünschenswerten wissenschaftlichen Ziele darstellt. In einem ersten Schritt erfolgten bereits die Analyse des Stands der Technik sowie die sich daraus ableitende Formulierung bestehender Defizite bzw. Forschungsbedarfe und Anforderungen an die Prüf- und Analysemethoden. Mit den Erkenntnissen aus diesen Betrachtungen lassen sich nun Hypothesen aufstellen, die im Ergebnis der vorliegenden Arbeit als Thesen bestätigt oder widerlegt werden sollen:

- I. Eine In-situ Prüfumgebung ist realisierbar, welche realistische und vergleichbare Betriebsparameter konventioneller Radbremsen vor dem Hintergrund von tribologischen Untersuchungen umsetzen kann.
- II. In-Situ Reibversuche mit einem Reibpartner aus Glas weisen vergleichbare Reib- bzw. Verschleißmechanismen im Vergleich zur konventionellen Graugußscheibe auf, so daß eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus der Visualisierung gegeben ist.
- III. Dynamische Reibprozesse können visualisiert werden (qualitative Beschreibung):
 - a) Visualisierbarkeit Partikeldynamik: das Partikelverhalten (Entstehung, Bewegung, Verharrung, Agglomeration, Reibzonenaustritt) kann orts- und zeitaufgelöst hinreichend genau erfaßt, dargestellt und qualitativ beschrieben werden.
 - b) Visualisierbarkeit Patchdynamik: das Patchverhalten (Generierung, Existenz, Zerstörung) kann orts- und zeitaufgelöst hinreichend genau erfaßt, dargestellt und qualitativ beschrieben werden.

- IV. Auch unter Nutzung eines hybriden Bremsscheibenkonzeptes (segmentierte Bremsscheibe) sind Charakterisierungen der Partikeldynamik realisierbar.
- V. Mit Hilfe einer segmentierten Bremsscheibe läßt sich die Patchdynamik charakterisieren.
- VI. Dynamische Reibprozesse können charakterisiert werden (quantitative Beschreibung):
 - a) Charakterisierbarkeit Partikeldynamik: mit Hilfe einer Partikeldetektion, -verfolgung und anschließenden Bewegungsanalyse kann die Partikeldynamik quantitativ bestimmt werden.
 - b) Charakterisierbarkeit Patchdynamik: durch eine Patchdetektion, Ermittlung der Patchdimensionen sowie Bezugnahme der Patchabmessungen auf den beobachteten Belagausschnitt (Bildausschnitt) kann die Patchdynamik quantitativ ermittelt werden.
- VII. Korrelationen zu Betriebsparametern bzw. tribologischen Größen können aufgezeigt werden anhand der:
 - a) Partikeldynamik: die ermittelten Angaben zur lokalen Partikeldynamik stehen in Zusammenhang mit globalen Parametern wie Relativgeschwindigkeit und Reibmoment.
 - b) Patchdynamik: die Dynamik der lokalen Patches bestimmt das globale Reibmoment
- VIII. Momentenüberhöhungen zu Beginn einer Bremsung (Initial Bite) sind wesentlich durch das Patchverhalten bestimmt.
- IX. In-situ Untersuchungen ermöglichen es, Reibringverlagerungen zu visualisieren. Damit lassen sich Zusammenhänge zwischen dem aktuell tragenden Reibring, der Reibringverlagerung und dem globalen Momentensignal formulieren.
- X. Die In-Situ Prüfumgebung erlaubt es, die Entstehung und Entwicklung Thermoelastischer Instabilitäten in der Reibzone zu beschreiben und zu charakterisieren. Dabei ist es auch möglich, diese

thermischen Phänomene in Bezug zum globalen Reibverhalten zu setzen.

- XI. Ortsaufgelöste physikalische und chemische Analysen verdeutlichen belagimmanentes Reibverhalten und können für die Erstellung eines Belagfingerprints hilfreich sein
- XII. Die Reibmatrix zeigt eine lokal unterschiedliche Steifigkeitsverteilung, die mit Hilfe einer erweiterten Kompressibilitätsmeßmethode ermittelt werden kann.
- XIII. Die zerstörungsfreie Analyse von Reibbelägen mittels Computertomographie erlaubt eine dreidimensionale ortsaufgelöste Bestimmung der Porositätsverteilung.
- XIV. Die Patchdynamik und –ausprägung wird maßgeblich durch die chemischen und physikalischen Eigenschaften, insbesondere durch das Steifigkeitsverhalten, des Verbundwerkstoffsystems Reibbelag bestimmt.

Die weiteren Schritte sind vor dem Schwerpunkt der Charakterisierung der Reibschicht zu sehen, erst zukünftig durch andere Arbeiten soll auch der Reibfilm berücksichtigt werden.

Im weiteren hat nun die Konzeption und Umsetzung einer Prüfeinrichtung für in-situ Messungen trockenlaufender Reibprozesse zu erfolgen (**Kapitel 6**). Hierzu sind die Auswahl und Gestaltung der Reibpartner, die Konzeption und Umsetzung der Prüfumgebung sowie die Erstellung zielführender Prüfprozedere vorzunehmen. Darauf aufbauend erfolgt die Vorstellung des inhaltlichen Schwerpunktes der Arbeit, den Visualisierungsversuchen, sowie den jeweiligen Auswertansätzen und -methoden in **Kapitel 7**. Werden zunächst die Ergebnisse des lokalen Patch- und Partikelverhaltens für ausgewählte Reibzonenausschnitte und ein hybrides Bremsscheibenkonzept vorgestellt, folgen diesen dann Betrachtungen zum lokalen Patch- und Partikelverhalten unter globalem Bezug. Gemeint ist eine diskrete Abrasterung der Reibzone, um Aussagen zu lokalen Besonderheiten der Reibschichtdynamik zu erhalten. Die globalen

Betrachtungen der Reibzone, die auch das Naßverhalten und Thermoelastische Instabilitäten berücksichtigen, schließen das Kapitel ab. Im weiteren erfolgen ergänzende Untersuchungen und Analysen das tribologische Verhalten und die physikalisch / chemischen Eigenschaften betreffend (**Kapitel 8**). Konkret wird zunächst das Reibverhalten unter Betrachtung des Reibmomentes und der Reibtemperaturen für verschiedene Reibpaarungen untersucht. Anschließend werden die Reibpartner zunächst hinsichtlich ihrer chemischen Oberflächenstruktur charakterisiert, um im weiteren speziell den Reibbelag physikalisch detaillierter zu betrachten. Neben Topographieuntersuchungen werden auch Betrachtungen zum lokalen Kompressibilitätsverhalten sowie der dreidimensionalen Porositätsverteilung vorgestellt. Mit diesen Analysen soll die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den modellhaften in-situ Beobachtungen auf konventionelle „Grauguß-Bremsscheibe – organischer Bremsbelag“ Reibpaarungen aufgezeigt werden. Ferner sollen Korrelationen zwischen lokalen Steifigkeitsverteilungen und lokalen Patchdynamiken aufgezeigt werden. Ebenso sollen Korrelationen zwischen globalen Reibmomenten und lokaler Patchdynamik bzw. dem lokalen Tragbild und dem lokalen Temperatureintrag betrachtet werden. Damit soll es möglich sein, bestehende Reibmodelle (unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens) wie beispielsweise von Musiol/Kleinlein/Dörsch/Loemba/Pöste (TU Berlin, Professor Severin) oder Müller/Bode/Graf (TU Braunschweig, Professor Ostermeyer) in ihren Annahmen und Modellierungsansätzen hinsichtlich des Partikel- und Patchverhaltens sowie dem sich einstellenden thermischen Verhaltens zu bestätigen oder auch zu widerlegen. Im Rahmen der Zusammenfassung (**Kapitel 9**) gilt es, die Erkenntnisse anhand einer Hypothesenüberprüfung (und Überführung in Thesen) übersichtlich und kompakt zusammenzutragen. Ein Ausblick (**Kapitel 10**) zu möglichen zukünftigen Anknüpfungspunkten und Anwendungen auf bestehende Fragestellungen der Reibbelaggestaltung schließt die Arbeit ab.

Aus dem schematischen Aufbau ergibt sich die in Abb. 6.1 (links) dargestellte konstruktive Gestaltung und physische Umsetzung (Abb. 6.1, rechts) der Baugruppen II und III. Eine Draufsicht auf das aufgebaute FTM findet sich zudem in Abb. 13.6.

Die Prüflingskühlung wird über das Belüftungssystem des Schwungmassenprüfstands realisiert. Für einige Prüfungen sind Benetzungsversuche vorgesehen, für die eine entsprechende Sprüheinrichtung Verwendung findet. Genutzt wird eine manuelle Pumpeinrichtung, die über einen Tank verfügt, in dem sich das (Leitungs-) Wasser für die Benetzung befindet (Abb. 13.7). Dieses wird mittels einer Rohrleitung und Sprühdüse auf den Reibring vor dem Einlauf des Reibbelages versprüht. Aufgrund der Nutzung dieser Pumpe sind definierte und reproduzierbare Benetzungen möglich.

Daneben erfolgt die Sensierung der Drehzahl, des Bremsdrucks sowie der Temperatur ebenso über den Schwungmassenprüfstand und dessen Datenerfassungshardware. Es wird eine zweite, dem FTM zugehörige Momentenmeßwelle aus Gründen höherer Genauigkeit genutzt.

Neben der Prüfstandshardware ist die Sensorik zur Umsetzung der in-situ Visualisierungen besonders hervorzuheben. Verwendung für die Erstellung der in-situ Videoaufnahmen findet das Hochgeschwindigkeitsmikroskopsystem VW 9000 der Firma Keyence (erkennbar in Abb. 6.1, rechts). Die Nutzung verschiedener Objektive und Zoom-Stufen ermöglicht es, in ihren Abmessungen unterschiedlich große Ausschnitte bzw. Bereiche zu erfassen. Die Kamera verfügt über eine sehr hohe Dynamik in Bezug auf die Bildwiederholraten (30 bis 230.000 fps) und erlaubt die Speicherung auch größerer Videodateien auf die Festplatte des Meßrechners.

Die Beleuchtung hat einen maßgeblichen Einfluß auf die Bildqualität sowie die Charakteristik der Video- und Mikroskopaufnahmen. Sie steht in direktem Zusammenhang mit den realisierbaren Abtastraten: je höher diese ausfallen, umso mehr Licht wird benötigt, da sich die

Belichtungszeiten verringern. Die Aufsicht-Dunkelfeldbeleuchtung des Kamerasystems läßt glatte und reflektierende Oberflächen dunkel erscheinen. Kanten und Defekte (Kratzer, Materialanlagerungen wie Patches) leuchten indes hell, was sie besser hervorhebt und leichter erkennen läßt. Raue und wenig reflektierende Flächen bedeuten andererseits durch die seitliche Anordnung der Beleuchtung eine lokale Schattenbildung, was Strukturen plastischer erscheinen läßt. Daher eignet sich dieses Verfahren sehr gut für in-situ Aufnahmen. Besonders in Verbindung mit einem Polarisationsfilter lassen sich somit die Besonderheiten der Oberflächentopographie der Reibzone charakterisieren. Genutzt werden neben der kameraintegrierten Belichtungsquelle auch weitere externe Lichtquellen, um eine möglichst hohe und gleichmäßige Ausleuchtung zu gewährleisten.

Neben der bereits vorgestellten Sensorik sind es besonders spezielle Objektive, die die Qualität der Meßergebnisse bestimmen. Standardmäßig (lokale, mikroskopische Betrachtungen) findet das Telezoomobjektiv Keyence Z20 W Verwendung, welches eine Vergrößerung zwischen 20- bis 200 fach (stufenlos, mit Rasterungen) besitzt und einen Arbeitsabstand von 25,5 mm erfordert (Tab. 13.2). Auf sekundäre Beleuchtungseinrichtungen kann aufgrund des geringen Arbeitsabstandes verzichtet werden. Genutzt werden indes die optionalen Beleuchtungsaufsätze Dunkelfeld (VH-K20) zur stufenlosen Einstellung des Lichteinfallwinkels bis zu einem extrem seitlichen Lichteinfall (360°) sowie ein Polarisationsfilter (OP-35415), der mit Hilfe des polarisierten Lichts die Durchsicht durch eine transparente Schicht (Glasscheibe) erlaubt.

Für Meßaufgaben, die den vollständigen Reibbelag berücksichtigen sollen (globale, makroskopische Betrachtungen), kommt eine Makrozoomeinheit mit ein- bis 60-facher Vergrößerung und einem Arbeitsabstand von 200 bis 2000 mm sowie einer integrierten seitlichen Beleuchtungseinheit zum Einsatz. Ergänzend wird mit sekundären Lichtquellen gearbeitet, um die

Beleuchtungsverhältnisse zu optimieren. Diese strahlen ebenfalls möglichst seitlich ein, um störende Reflexionen zu vermeiden.

Einzelne Untersuchungen (im Falle segmentierter Graugußscheiben SGG) erfolgen zudem mit einem Telezoom-Objektiv VH-Z50W mit besonders hohen Vergrößerungen von 50- bis 500-fach, stufenlosem Zoom sowie Rasterungen von 50x (Tab. 13.3). Da der Arbeitsabstand mit 85 mm recht hoch ausfällt, reicht die koaxial-vertikale Hellfeldbeleuchtung für Messungen mit hohen Abtastraten (größer 500 fps) nicht aus. Daher wird ein Hochleistungsscheinwerfer verwendet, der eine optimale Ausleuchtung gewährleistet.

Neben den Videoaufnahmen sollen auch globale Einzelaufnahmen (mit relativ schneller Bildfolge) der Reibzone erstellt werden, um auftretende Hitzeflecken in der Reibzone zu erfassen. Hierfür wird eine digitale Spiegelreflexkamera vom Typ Nikon D40 in Kombination mit einem Nikon AF-S Nikkor 18-55 mm 1:3.5-5.6 G II ED – Objektiv genutzt. Anders als bei den Videoaufnahmen wird keine separate Beleuchtung berücksichtigt, sondern die Prüfumgebung fast vollständig abgedunkelt, um die Hitzeflecken optimal zu dokumentieren. Die sich daraus ergebenden erhöhten Belichtungszeiten (nicht manuell eingestellt) erlauben Bildaufnahmesequenzen mit einem zeitlichen Abstand von 1 bis 2 Sekunden.

Für zukünftige, anschließende Arbeiten ist es ebenso denkbar, optische Sensorsysteme zur Erfassung von Oberflächenschwingungen einzusetzen. Mit Hilfe eines dreidimensionalen Laserscanningvibrometers können beispielsweise Schwingungen von Partikeln bzw. Patches in-situ charakterisiert werden.

6.2 Prüflinge

Im Rahmen der geplanten in-situ Visualisierungsuntersuchungen sind entsprechende Prüflinge auszuwählen bzw. zu gestalten. Dies betrifft die beiden Reibpartner Bremsscheibe und Reibbelag.

6.2.1 Bremsscheibe

Nach umfangreichen Voruntersuchungen an verschiedenen Glaswerkstoffen in Bezug auf das tribologische, thermische und mechanische Verhalten, aber auch die Möglichkeiten der Visualisierung, wurde schließlich Borosilikatglas aus einem direkten Vergleich mit Quarz- und Saphirglas als die beste Variante ausgewählt. Es erzielt die optisch besten Ergebnisse, indem sowohl die Partikel-, als auch die Patchdynamik sich am besten beobachten lassen. Zudem sind sowohl „Verschmierungen“, als auch Verschmelzungen im Vergleich zu den anderen Gläsern weniger stark ausgeprägt. Daneben hat es sich als thermisch und mechanisch überaus robust gezeigt, ist relativ kratzunempfindlich (wichtig für längerdauernde Schleppbremsungen) und zudem preislich sehr attraktiv. In Tab. 13.1 findet sich eine Gegenüberstellung ausgewählter Eigenschaften für die untersuchten Gläser sowie zweier typischer Grauguß-Legierungen. [86], [87], [88], [89], [90], [91]

Diese Übersicht verdeutlicht die Unterschiede zwischen Grauguß und den untersuchten Gläsern hinsichtlich ausgewählter mechanischer und thermischer Eigenschaftswerte. Die Gläser weisen insbesondere eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit auf, was sich auch auf die thermischen Verhältnisse in der Reibzone auswirkt. Daher ist es unumgänglich, die in-situ Ergebnisse auf ihre Übertragbarkeit auf konventionelle Graugußscheiben (GGS) zu prüfen.

Der konstruktiven Umsetzung der Bremsscheibe fällt bei den angestrebten Untersuchungen eine besondere Rolle zu. Sie ist derart zu gestalten, daß eine Visualisierung der Reibzone in-situ möglich ist. Gleichzeitig ist sicherzustellen, daß die mechanischen und thermischen Anforderungen an eine Radbremse zumindest für moderate Bremsapplikationen erfüllt werden. Insgesamt werden drei verschiedene Bremsscheibenkonzepte verfolgt. Zu Zwecken der Visualisierung soll eine Vollglasscheibe (VGS) genutzt werden, wie sie in Abb. 6.2 vor- und dargestellt ist.

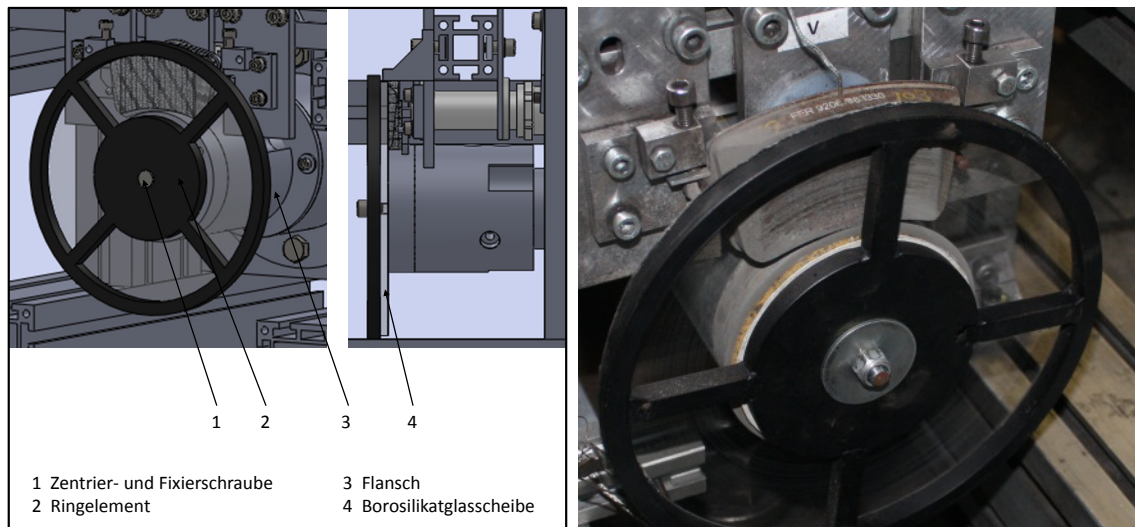


Abb. 6.2: schematische Darstellung der Gestaltung der Vollglasscheibe sowie ihrer Anbindung (links), aufgebaute Vollglasbremsscheibe am FTM (rechts)

Es wurde eine Schraubverbindung (zum Zentrieren und Fixieren) in Kombination mit einer steifigkeitserhöhenden Maßnahme, einem umlaufenden Ringelement, konstruktiv umgesetzt. Jenes bewirkt ein Abstützen der ansonsten einseitigen Belastung der Glasscheibe. Dadurch erhöhen sich die Haltbarkeit und Belastbarkeit der VGS deutlich.

Ein weiteres Konzept findet sich in Form einer **segmentierten Grauguß-Bremsscheibe** (SGG). Sie stellt einen guten Kompromiß aus mechanischer und thermischer Belastbarkeit sowie optischer Zugänglichkeit der Kontaktzone dar. Zudem bedeutet der verhältnismäßig geringe Glasanteil des Reibrings annähernd identische Reibeigenschaften wie bei konventionellen Grauguß-Bremsscheiben, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse verbessern soll. Kritisch in der Umsetzung ist die Integration der Glassegmente in den Graugußreibring, da Besonderheiten des Glaswerkstoffes bei der Fassung zu beachten sind. Es darf lediglich auf Druck belastet werden, möglichst nicht auf Zug und auf keinen Fall auf Biegung oder Torsion (siehe hierzu auch [86], [89], [90] und [93]).

Letztlich wird ein kleinflächiges, kreisförmiges Glassegment in den Reibring eingelassen. Die Fensterform ist das Ergebnis von simulativen Voruntersuchungen, die die thermomechanischen Belastungen auf eckige

und runde Segmente betrachtet haben. Die Wahl fiel auf die kreisrunde Variante, da hier eine homogenere Verteilung der Spannungen über den Segmentumfang zu beobachten ist. Zudem fallen die maximalen Spannungen deutlich geringer aus (Abb. 13.8). Die Sicherung in radialer und tangentialer Richtung erfolgt dabei formschlüssig, wohingegen axial weitere Maßnahmen erforderlich sind. Der Bearbeitungsaufwand wird als gering bewertet, das Glassegment kann ohne Nachbearbeitung verwendet werden. Die thermomechanischen Spannungen werden jedoch als hoch eingeschätzt. Daher wird ein Industriekleber (Loctite 5920) für die axiale Sicherung nach umfangreichen Vorversuchen ausgewählt, der das Glassegment sicher fixiert und auch mögliche thermomechanische Spannungen kompensieren kann.

Die schließlich aufgebauten und für die in-situ Versuche genutzten SGG sind in zwei Varianten gestaltet. Zum einen werden Glassegmente berücksichtigt, die axial die gleiche Höhe aufweisen wie der Graugußreibring und als SGG_e bezeichnet werden (Graugußscheibe mit ebenen Glassegmenten), dargestellt in Abb. 6.3. Demnach sind beide Materialien stets im Reibkontakt mit dem Bremsbelag.

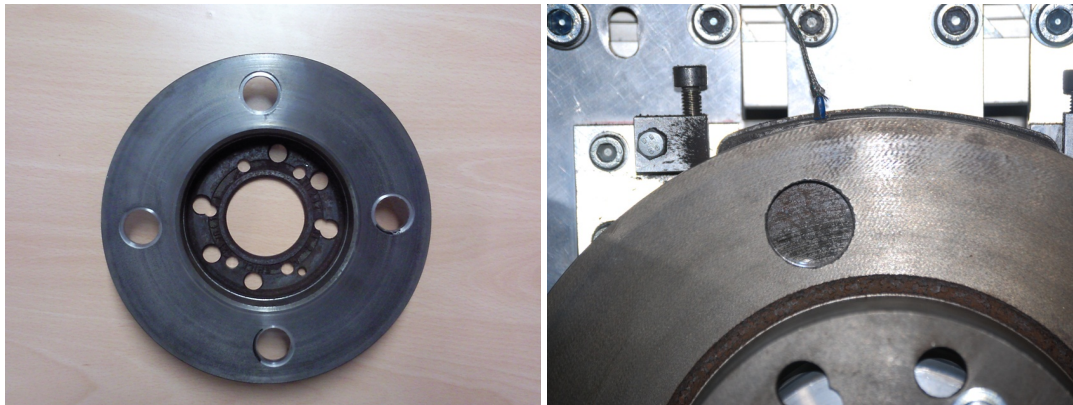


Abb. 6.3: Segmentierte Graugußscheibe (SGG) mit 4 Glassegmenten (links), verbaute SGG am FTM (rechts)

Zum anderen werden Scheiben mit in axialer Richtung versetzten Glassegmenten (SGG_v – Graugußscheibe mit versetzten Glassegmenten) verwendet. Das Glas ist hierbei abgesenkt und aus dem Reibkontakt

genommen, um den Glaseinfluß auf den Reibprozeß zu eliminieren und lediglich die Sicht auf die Reibzone freizugeben.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der gewonnenen Visualisierungserkenntnisse auf herkömmliche Reibpaarungen wird auch eine konventionelle Bremsscheibe aus **Grauguß (GGS)** in die Untersuchungen miteinbezogen. Sie entspricht in ihrer Ausführung der segmentierten Scheibe (SGG), jedoch wird der Reibring in diesem Fall nicht bearbeitet.

6.2.2 Reibbelag

Im Rahmen der Untersuchungen werden verschiedene Reibpaarungen untersucht. Zwar stellt der Aufbau grundsätzlich eine vereinfachte Prüfumgebung dar, jedoch soll insbesondere der Reibbelag konventionell sein, um möglichst verwertbare Aussagen für die Reibbelagentwicklung zu gewinnen (Abb. 13.9, links). Daher erfährt der Reibbelag keinerlei geometrische Modifikationen, Variationen werden in Form der Belagzeptur berücksichtigt. Die Auswahl orientiert sich an aktuellen Marktdurchdringungen sowie zukünftigen Trends. Somit findet ein NAO-Belag (NAO) Verwendung, der im asiatischen und nordamerikanischen Raum weit verbreitet ist. Daneben wird ein Low Steel-Belag, der für den europäischen Markt bestimmt ist und auch als ECE-Belag bezeichnet wird, untersucht (ECE-mk). Bei dem dritten Belagkonzept handelt es sich ebenfalls um einen Low Steel, der den zukünftigen Forderungen nach Kupferfreiheit nachkommt und auf dieses chemische Element verzichtet (ECE-kf).

Die Charakterisierung bzw. Klassifizierung der flächenhaften Ausdehnung des Belages soll für die radiale und tangential Richtung erfolgen, wobei eine Einteilung in die Bereiche Einlauf, Belagmitte und Auslauf für die tangential Ausdehnung vorgenommen wird. Die radiale Ausdehnung sieht eine Unterteilung in inneren, mittleren und äußeren Reibradius vor. Anwendungen dieser Untergliederungen erfolgen für die in-situ Visualisierungscharakterisierungen und die chemischen Elementanalysen,

die orts aufgelöst vorgenommen werden und ein Meßraster mit 9 Meßpunkten (Abb. 13.9, rechts) berücksichtigen, sowie für die lokalen Kompressibilitäts- und Porositätsbestimmungen.

6.3 Prüfprozedere

Prüfprozedere stellen einen wesentlichen Bestandteil der experimentellen Untersuchungen dar. In ihnen werden nicht nur die Betriebsparameter definiert, sondern sie bilden auch die Basis für Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Messungen. Prüfprozedere besitzen einen großen Einfluß auf das Reibverhalten, da sie die Konditionierung und das Einlaufen, das Belasten bzw. Überlasten sowie das Verschleißverhalten der Reibpaarung prägen. Auch die Ausbildung des Tragbildes bzw. der Flächenpressungsverhältnisse wird durch sie maßgeblich mitbestimmt.

Ebenso sind sie verantwortlich für die Güte der erzielten Ergebnisse und die Möglichkeit der Untersuchung bestimmter Phänomene.

Analog zu standardisierten Prüfprozederen wie dem AK Master ([92]), der aufgrund seiner zu hohen mechanischen und thermischen Belastungen für die VGS und SGG nicht Verwendung finden kann und lediglich zu Referenzzwecken im Rahmen der Untersuchungen mit der GGS genutzt wird, ist auch für die angestrebten in-situ Versuche ein **Einlaufprogramm** (Bedding) zu berücksichtigen. Dieses wird jedoch auf die speziellen Besonderheiten, wie die geringeren mechanischen Festigkeiten der verwendeten Brems Scheiben, abgestimmt. Es setzt sich aus verschiedenen Zyklen zusammen, die mit Stopbremsungen beginnen und enden, welche der Reibwertcharakterisierung des AK Master nachempfunden sind. Dazwischen erfolgen Schleppbremsungen, da diese ein wichtiger Bestandteil der späteren Untersuchungen sind und sie sich als ein geeigneter Bestandteil für das Bedding erwiesen haben. Aufgrund der großen Varianz der Betriebsparameter (Veränderlichkeit von Modus, Drehzahl, Bremsdruck und Temperatur) kann sichergestellt werden, daß die Reibpaarung nach Beendigung des Beddings eingelaufen ist, so daß sich

Bremsmoment und die Temperatursignale auf einem konstanten Niveau befinden.

Die Betrachtung während und am Ende des Beddings verdeutlicht, daß der tragende (anliegende) Bereich (Abb. 13.10, rote Markierung) auf der Belagoberfläche immer weiter wächst, um am Ende den Belag nahezu vollflächig zu bedecken. Dabei sei bemerkt, daß jeweils während der Druckapplikation nicht die komplette Belagfläche anliegt, sondern lediglich einzelne Reibringe, welche sich während einer Bremsung verlagern.

Mit dem Prozedere **Schleppbremsungen** sind Bremsszenarien gemeint, bei denen die Geschwindigkeit beibehalten und somit gegen den Antrieb gebremst wird. Diese Vorgehensweise wird als hilfreich erachtet, um das Verhalten (transient und stationär) einer Reibpaarung zu charakterisieren. Auch andere Forschungsgruppen und Wissenschaftler, wie die Gruppe um Professor Severin an der TU Berlin (u.a. Musiol und Dörsch), Staffan Jacobson von der University of Uppsala oder Hany Ali Sherif berücksichtigten Schleppbremsungen über z.T. sehr lange Zeiträume (Dörsch: 50 Minuten pro Meßzyklus). Im Anschluß an das obligatorische Bedding folgen drei Zyklen mit verschiedenen Drehzahlen und bei jeweils konstantem Bremsdruck. Dabei wird stets zu Beginn einer jeden Prüfung auf die definierte Initialtemperatur heruntergekühlt, wobei während der Schleppbremsung selbst keine Kühlung erfolgt.

Als weitere und letzte soll die Stop-Prozedur vorgestellt werden. Sie berücksichtigt **Stopbremsungen**, die dadurch charakterisiert sind, daß der Bremsdruck konstant bleibt und von einer Initialgeschwindigkeit in den Stillstand verzögert wird. Besonders interessant ist demnach das transient dynamische Verhalten der Reibpaarung. Eine Orientierung erfolgt an Prüfstandards wie dem AK Master, jedoch sollen die mechanischen und thermischen Belastungen moderater ausfallen, um die VGS nicht zu überlasten und zu schädigen.

7 Visualisierungsuntersuchungen zum in-situ Reibverhalten

Nach der Vorstellung der Prüfumgebung sollen die Methoden und Ergebnisse der in-situ Visualisierungsversuche zum Reibverhalten vorgestellt werden. Dies geschieht für lokale und globale Untersuchungen vor dem Hintergrund, die Mechanismen auf der mikroskopischen Ebene mit den Beobachtungen auf der makroskopischen Ebene in Verbindung zu bringen und letztlich Bezüge zum globalen Reibverhalten, insbesondere dem Reibmoment, herzustellen. Die Basis dafür bilden sowohl die vollständige Reibzone, unter der stets die nominelle Kontaktfläche der Reibpaarung zu verstehen ist, als auch lokale Reibzonenausschnitte.

7.1 Lokales Patchverhalten

Bei den im Folgenden vorgestellten Patchanalysen, also der Charakterisierung von Partikelablagerungen und –verfestigungen vor dem Hintergrund der Reibkraftübertragung, erfolgen keine Objektverfolgungen oder Bewegungsanalysen, wie sie bei der Analyse von Partikelbewegungen notwendig sind.

Ausgewertet werden indes Einzelbilder der Videosequenzen zu diskreten Zeitpunkten (Abb. 13.11). Gegenstand der Auswertung sind die Ausdehnungen und Flächen der an der Reibkraftübertragung partizipierenden Patches. Diese Patches sind im Sinne der Erkenntnisse der Gruppe um Jacobson als Sekundärpatches zu charakterisieren, werden in der vorliegenden Arbeit aufgrund ihres Charakters aber auch als Verfestigungspatch bezeichnet.

Bei den lokalen Patchanalysen werden ausgewählte Reibzonenbereiche, die an der Reibkraftübertragung beteiligt sind, betrachtet. Genutzt werden hierfür hohe Vergrößerungen von 150-fach sowie 200-fach und maximale Abtastraten von 500 fps. Da die Dynamik der geometrischen Patchänderungen unterhalb derer der Partikelbewegungen liegt, ist eine zum Teil deutliche Reduktion der Bildabtastraten zulässig.

Die Analyse der Ausdehnungen sowie der bedeckten Flächen der Patches erfolgt mittels einer manuellen Polygonzugmethode und unter Nutzung des

Programms „VW 9000 Motion Analyzer“ der Firma Keyence. Dies hat den Vorteil, daß keine aufwendige Vorverarbeitung der Bilddaten erforderlich ist und die Benutzung intuitiv erfolgt. Lediglich eine Kalibrierung der Aufnahmen ist erforderlich, um eine korrekte Skalierung und Ausmessung zu ermöglichen. Jedoch ist dieses manuelle Analyseverfahren aufwendig, speziell bei der Analyse großer Datenmengen.

Berücksichtigt werden einzelne Stopbremsungen sowie Bremssequenzen (Folgebremssungen) für die Borosilikatvollglasscheibe VGS in Verbindung mit den drei bekannten Belagkonzepten. Die betrachteten Reibzonenausschnitte wurden so gewählt, daß sie Bereiche repräsentieren, die sich an der Kraftübertragung beteiligen. Auf diese Art und Weise lassen sich dynamische Änderungen der Reibschicht bzw. des dritten Reibkörpers erfassen und charakterisieren. In diesem Zusammenhang ist zu betonen, daß es sich um repräsentative Beispiele handelt, die stellvertretend für mehrfach durchgeführte Messungen (an verschiedenen Reibzonenausschnitten) und Analysen stehen.

Im Ergebnis stehen die Ausdehnungen bzw. Flächen der Patches (Sekundärpatches) sowie die dynamische Veränderlichkeit der geometrischen Dimensionen. Auch wird versucht, einen Bezug zu den globalen Reibparametern, also die Korrelation von globalem Reibmoment und sich einstellender Patchdynamik, herzustellen.

7.1.1 Initialverhalten

Das Initialverhalten berücksichtigt die Anfangsphase der Bremsung, was dem Aufbau der an der Kraftübertragung beteiligten Patches entspricht. Insbesondere der **NAO** zeigt ein auffälliges Initialverhalten des Reibmomentes (Abb. 13.12). Die auftretende und auffällige Momentenüberhöhung zu Beginn der Bremsung ist auch als Initial Bite bekannt. Damit wächst das Fahrer Vertrauen zu Beginn der Bremsung durch eine hohe Bremsleistung, da es einfach ist, mit wenig Pedalkraft eine hohe Verzögerung zu erzielen. Eine schlechtere Dosierbarkeit kann jedoch die

Folge sein. Mittels der in-situ Analysen soll nun geklärt werden, wie sich die Reibzone in Bezug auf den initialen Momentenverlauf verhält.

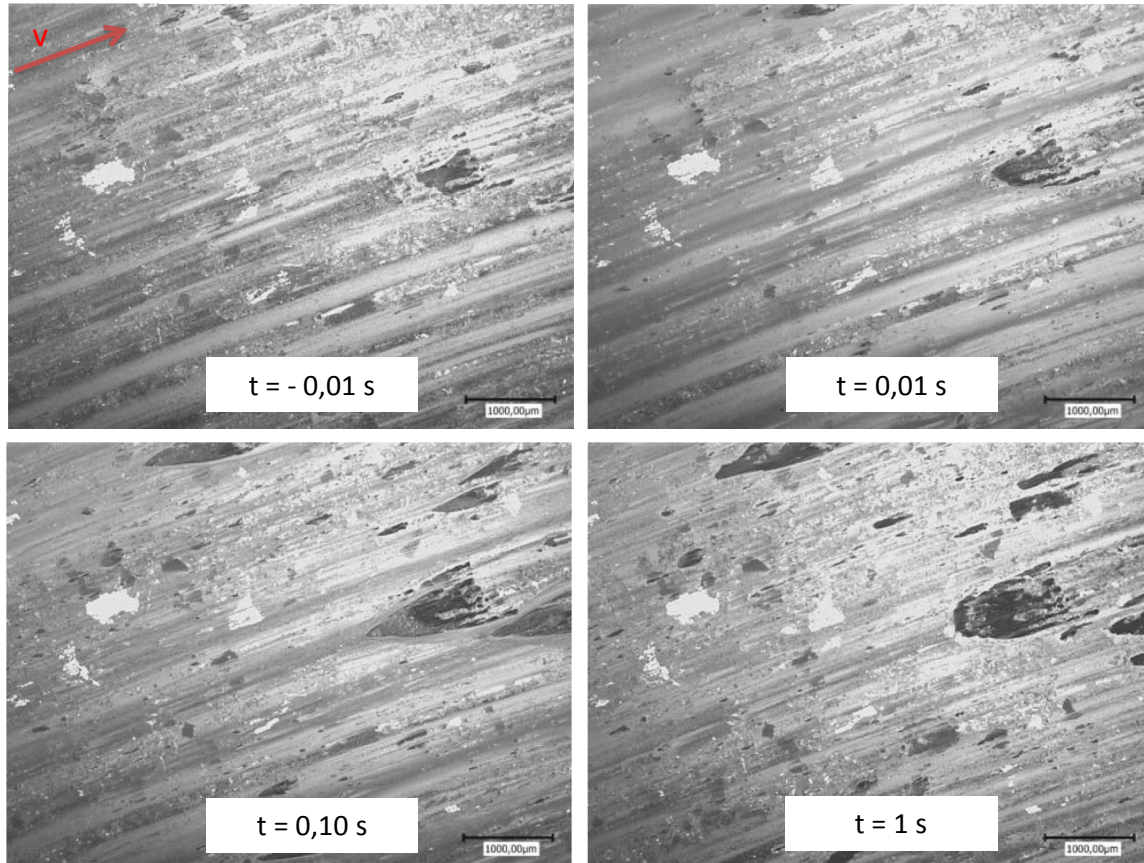


Abb. 7.1: Darstellung der Reibzone für die Initialphase einer Stoppbremmung (NAO-Belag)

In Abb. 7.1 ist das Initialverhalten der Reibzone dargestellt (Drehrichtung ist durch den Pfeil gekennzeichnet). Dabei fällt auf, daß vor der Druckapplikation ($t = -0,01$ s) nur ein geringer Partikelstrom, bewirkt durch das Restbremsmoment, zu beobachten ist. Mit dem Einsetzen des Bremsdrucks (ab $t = 0,01$ s) erhöht sich der Partikelstrom in der Kontaktzone deutlich, so daß sich ab $t = 0,10$ s eine trichterförmige Grundstruktur des Patches ausbilden kann. Bis zum Zeitpunkt $t = 1,00$ s bildet sich eine erste Grundform der Patches aus. Für die Ausprägung des Patches sind nicht zwingend Primärplateaus hoher Härte erforderlich, sondern es reichen erhabene Bereiche (mit geringerer Härte) aus, die im

weiteren als Inhomogenitäten bezeichnet werden, so daß sich Partikel an ihnen ablagern können. Aufgrund der mechanischen und thermischen Belastungen werden diese Partikelablagerungen im weiteren kompaktiert und verfestigt.

Der deutliche Anstieg der Patchausdehnung (ermittelt als zurückgelegter Weg der Patchspitze auf der jeweiligen Gleitbahn) zu Beginn der Bremsung soll näher betrachtet werden (Abb. 7.2). Da die Messungen mit Abtastraten von 100 Hz erfolgten, können verschiedene Zeitskalen analysiert werden.

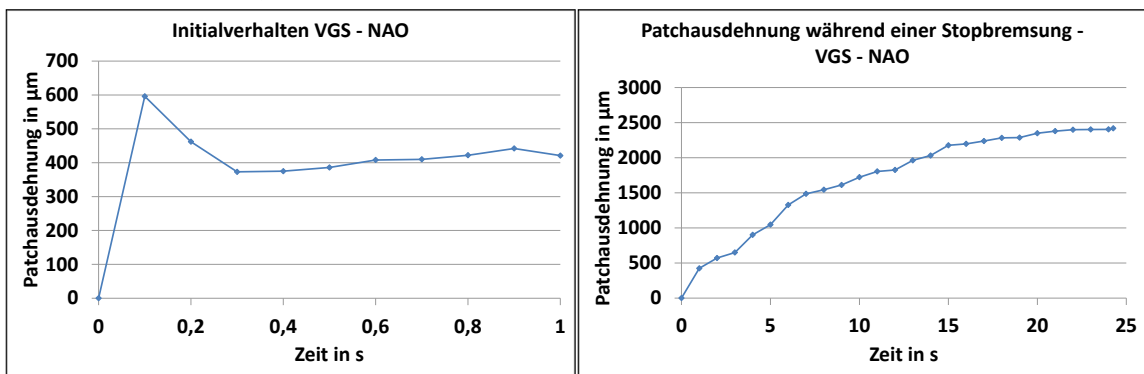


Abb. 7.2: longitudinale Patchausdehnung für die Initial- und Verfestigungsphase (links) sowie die Patchwachstums- und Verlagerungsphase (rechts)

Die Untersuchung im Zehntel- und im Hundertstelsekundenbereich offenbart, daß der deutliche Anstieg der Patchausdehnung sehr schnell abläuft und bereits innerhalb von ca. 0,1 s abgeschlossen ist. Der Initialisierung des Sekundärpatches schließt sich im folgenden eine langsamere Patchausdehnung an, die zum Ende der Bremsung gegen einen Grenzwert konvergiert (was in Kapitel 7.1.2 noch näher untersucht wird). Dies kann mit den geringer werdenden Partikelströmen, bedingt durch die sinkende Relativgeschwindigkeit, erklärt werden.

Anhand räumlich und zeitlich gezoomter Bildausschnitte der Reibzone kann das Initialverhalten noch detaillierter beschrieben werden (Abb. 7.3).

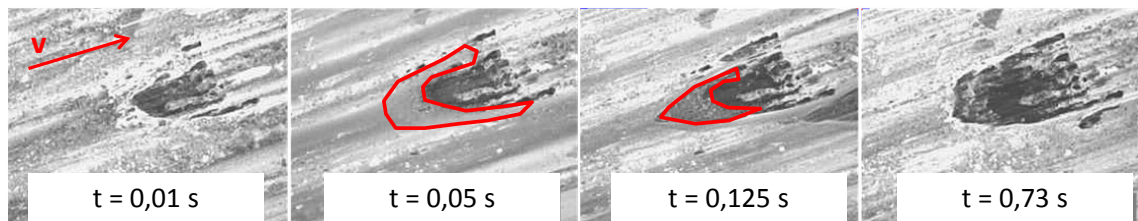


Abb. 7.3: initiales Patchverhalten, betrachteter Reibzonenausschnitt: ca. 2,5 x 2mm

Der Ausgangspunkt für dieses Beispiel ist der bereits gebildete Grundpatch, der auch als Sekundärpatch bezeichnet werden kann. Er ist in einer überaus kurzen Zeitdauer entstanden und bereits nach 0,01 Sekunden zu erkennen. Nach der Anlegephase des Reibbelages ($t = 0 - 0,05$ s) bildet sich ein signifikanter Verschleißpartikelstrom aus kleinen Partikeln, der sich vor dem Sekundärpatch anlagert. Diese Partikel bzw. Partikelströme können aufgrund ihrer geringen Abmessungen örtlich nicht aufgelöst werden, lassen sich jedoch anhand eines dunkleren Schleiers vor dem Grundpatch erkennen. Nach $t = 0,125$ s zeigen sich an der Grenzfläche des Sekundärpatches deutliche Partikelanlagerungen mit einem dunkler werdenden Kontrast, welche komprimiert erscheinen. Diese Anlagerungen sind zwar komprimiert, jedoch noch recht lose und besitzen keine hohe mechanische Festigkeit. Zwischen $t = 0,125$ und $t = 0,730$ s erfolgt ein Verfestigungsprozess der Abriebpartikel, so daß sich eine Patchstruktur hoher Härte ausprägt, bei der die Festigkeit deutlich zunimmt. Dies scheint mit dem zuvor erkannten Initial Bite gut zu korrelieren, da dieses sein Maximum ebenfalls nach ca. 0,8 Sekunden erreicht. Nach zirka einer Sekunde hat sich ein robustes und stabiles Sekundärplateau ausgebildet, welches stark und groß genug ist, um Reibkräfte zu übertragen und möglicherweise im weiteren Verlauf der Bremsung weiter zu wachsen und / oder sich zu verlagern.

Als Zwischenfazit ist festzuhalten, daß Inhomogenitäten bei dem NAO-Belag genügen, um Sekundärpatches zu bilden. Harte und große Primärplateaus, wie sie besonders bei Low Steel Belägen beobachtet werden, sind nicht zwingend notwendig. Da eine zeitliche

Übereinstimmung zwischen dem Initial Bite und Ausbildung eines robusten Sekundärpatches nachgewiesen werden konnte, ist zu vermuten, daß hier ein enger Zusammenhang besteht.

In Abb. 7.4 ist das (gezoomte) Patchverhalten der Reibzone für den **ECE-kf** Belag dargestellt.

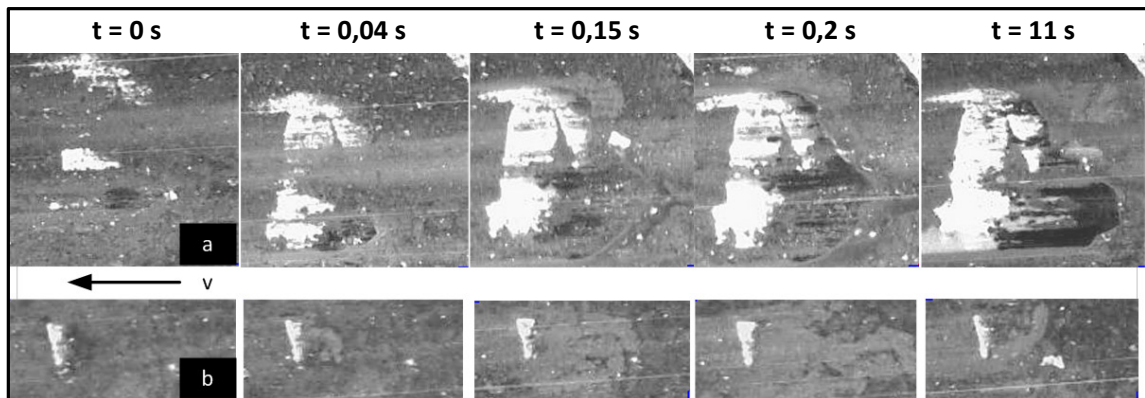


Abb. 7.4: Patchverhalten eines ECE-kf Belages: a) Patchentstehung, b) Anlagerung Verschleißpartikel

Hierbei zeigt sich eine geänderte Plateaubildung im Vergleich zum NAO. Die hellen Bereiche entsprechen harten Plateaus, die als Primärplateaus charakterisiert werden können. An ihnen lagern sich die Verschleißpartikel an und können verfestigt werden. Eine signifikante Verlagerung indes ist kaum erkennbar, da die Sekundärplateaus stark an die Primärplateaus gebunden sind.

Zudem sind primäre Kontaktstellen erkennbar (Abb. 7.4, b), an denen sich Abriebpartikel nur lose ansammeln, eine Verfestigung erfolgt nicht. Dennoch können auch diese Bereiche sich an der Lastübertragung beteiligen, obgleich sich ihre Ausdehnung sehr dynamisch ändert.

Die Analyse der Sekundärpatches erfolgt in Abb. 7.5 bezüglich der Patchfläche anstatt der Patchausdehnung, da die Patches beim ECE-kf auch deutliche Änderungen transversaler Ausdehnung erfahren. Zu Zwecken der Vergleichbarkeit wird dieses Vorgehen für alle weiteren Analysen beibehalten. Zu erkennen ist, daß Patch 1 zunächst kaum eine Reaktion auf den angelegten Bremsdruck zeigt. Seine Fläche ist nahezu konstant und

nimmt nur sehr geringe Werte an. Nachdem sich der Sekundärpatch etabliert hat, wächst er mit einer annähernd konstanten Rate bis zum Ende der ersten Sekunde der Bremsung. Der zweite analysierte Patch verdeutlicht zunächst ein sehr dynamisches Wachstum, ähnlich wie beim NAO. Jedoch wird der Patch nach einer abrupten Flächenzunahme innerhalb der ersten 0,15 Sekunden wieder kleiner. Betrachtet man die Summe beider Patchflächen, zeigt sich ein (qualitativ) ähnlicher Kurvenverlauf, wie er bereits beim NAO zu erkennen war. Begründet wird dieses abweichende Patchverhalten mit einer gegenseitigen Beeinflussung der Patches, die der NAO nur selten zeigt und die im weiteren noch detaillierter untersucht wird.

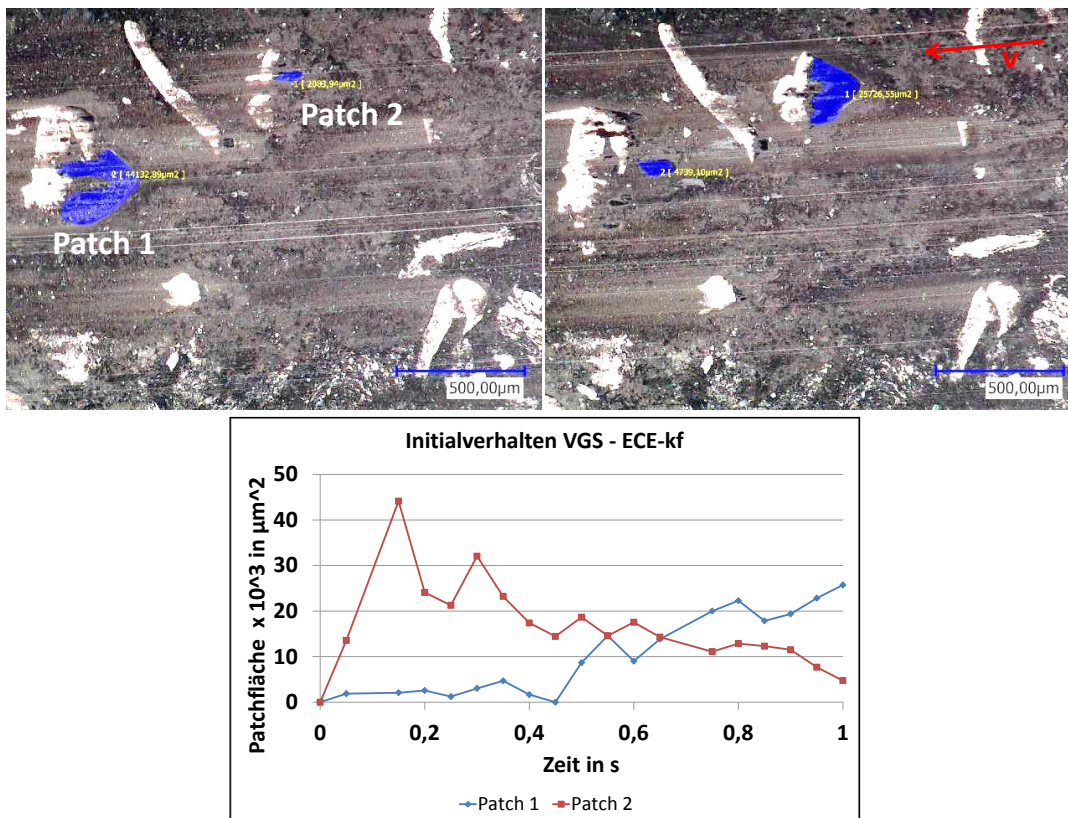


Abb. 7.5: Initialverhalten der Patchausdehnung bei einem ECE-kf, bei $t = 0,15$ s (links) sowie $t = 1$ s (rechts), zeitliches Verhalten (unten)

Die Aufsummierung der jeweiligen Patchflächen wird als zulässig und notwendig erachtet, da die gleichen Partikelströme verschiedene

Sekundärpatches speisen können, während beim NAO jeweils separate Partikelströme für jeden Patch bestehen. Damit wird der Einfluß der gegenseitigen Patchwechselwirkungen bzw. durch die sich aufteilenden Partikelströme auf die Patchfläche eliminiert, so daß diese vergleichbar zu der des NAO wird.

Somit kann festgehalten werden, daß sich die Gestalt der Patches zum NAO deutlich unterscheidet, da nun Primär- und Sekundärpatches ausgemacht werden können. Zudem sind Bereiche loser, agglomerierter Abriebpartikel gut zu erkennen. Die Dynamik ist (qualitativ) vergleichbar, jedoch geringfügig unter der des NAO, und nicht für alle Sekundärpatches gleichermaßen gültig.

Hinsichtlich der Plateau- und Patchausprägung ist der **ECE-mk** mit dem ECE-kf vergleichbar.

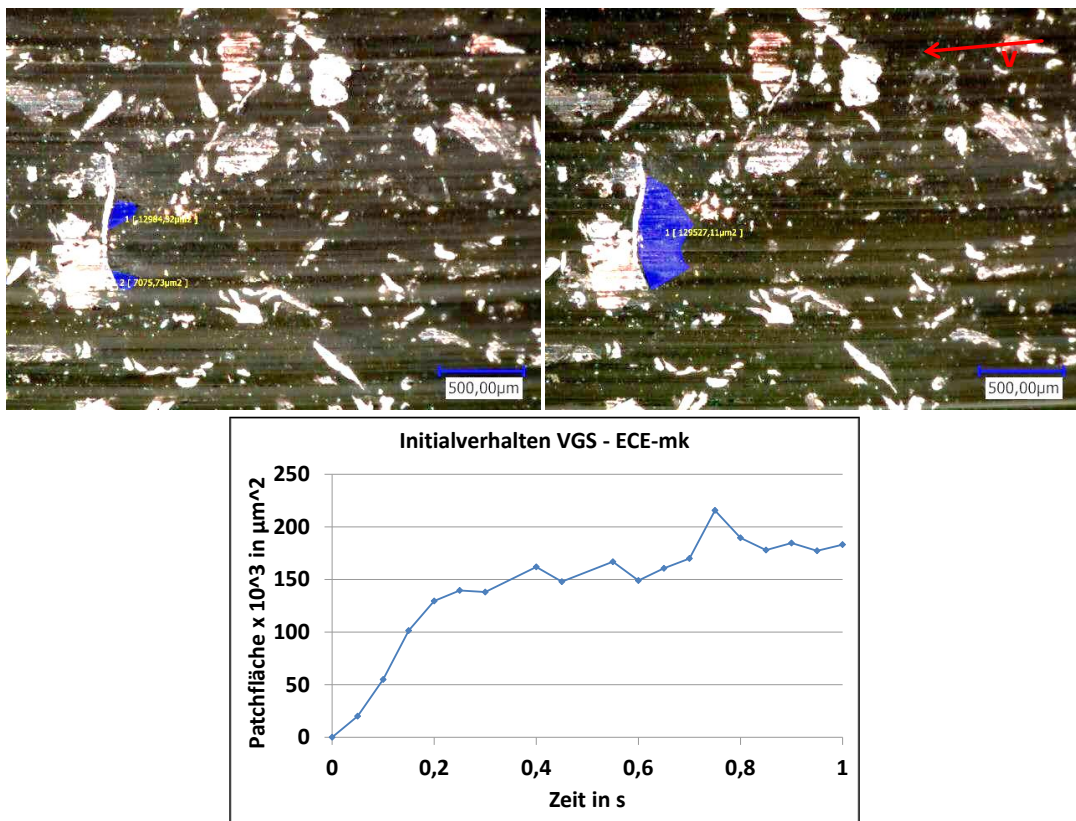


Abb. 7.6: Initialverhalten der Patchausdehnung bei einem ECE-mk, bei $t = 0,05$ s (links) sowie $t = 0,2$ s (rechts), zeitliches Verhalten (unten)

Es bestehen Primärplateaus, an denen sich Sekundärpatches und auch lose agglomerierte Abriebpartikel ansammeln können. Neben den als Primärplateau gut geeigneten Eisenspänen sind es auch Kupferplateaus, die als Primärpatch fungieren können. Beispielhaft wird ein Sekundärpatch vorgestellt, der sich an einem kombinierten Primärpatch (Eisenspan sowie Kupferplateau) bildet (Abb. 7.6). Auch wenn sich zwischenzeitlich eine Separierung in kleinere Patches einstellt, wird der untersuchte Bereich als ein Sekundärpatch aufgefaßt und vermessen.

Die Dynamik der Initialphase ist deutlich erkennbar, wonach nach ca. 0,2 Sekunden der Patch fest etabliert ist. Im weiteren wächst er leicht und der Verlauf erinnert an den des NAO, obgleich er nicht dessen Dynamik zu Beginn der Bremsung erreicht. Somit kann festgehalten werden, daß alle drei Beläge gut erkennbare Sekundärpatches aufweisen. Während der NAO jedoch eher Inhomogenitäten für deren Anlagerung aufweist, sind es robuste Primärpatches bei den ECE-Belägen. Der NAO zeigt die dynamischste Initialphase: Sekundärpatches sind bereits nach 0,01 Sekunden erkennbar und nach 0,1 Sekunden fest etabliert. Im weiteren wachsen die Patches nur noch langsam. Diese Dynamik des NAO könnte als Erklärung für das gut erkennbare Initialverhalten des Momentenverlaufs (Initial Bite) dienen. Ähnliche Kurvenverläufe zeigen auch die beiden ECE-Beläge, nur mit einer geringeren Dynamik zu Beginn. Da die beiden ECE-Beläge kein Initial Bite erkennen lassen, würde dies die Bedeutung der Initialdynamik in Bezug auf die Ausprägung eines Initial Bites erklären können.

7.1.2 Einzelbremsung

Das Verhalten der Reibschicht innerhalb einer vollständigen Bremsung soll im weiteren näher betrachtet werden.

Das sich einstellende Patchverhalten beim NAO für den weiteren Zeitverlauf der Bremsung bis zum Stillstand ist in Abb. 7.7 (ab $t = 5$ s) dargestellt. Ebenso findet sich eine Abbildung der Reibzone nach erfolgter Drehzahlsteigerung für eine folgende Stopbremsung.

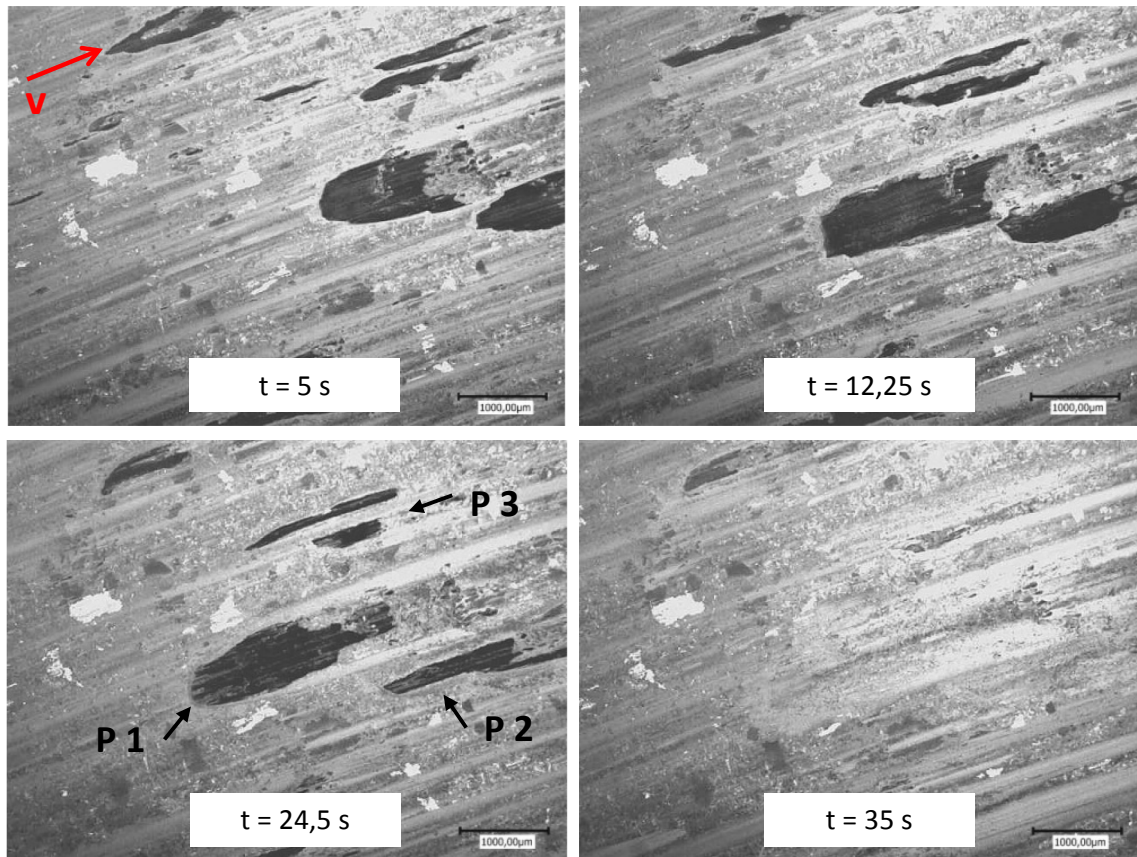


Abb. 7.7: Darstellung der Patchbildung nach einer Initialphase bis zum Stillstand sowie erneuter Drehzahlsteigerung (NAO-Belag)

Grundsätzlich kann man die Zeitdauer von $t = 1,0$ bis $t = 24,5$ s als Wachstums- und Verlagerungsphase bezeichnen, in der sich die Patches weiterhin ausbilden und auch räumlich verlagern können. Es werden zwei Arten von Sekundärpatches erkannt. Zum einen welche, bei denen im weiteren Verlauf der Bremsung nach der Initialphase die Fläche weiterhin deutlich zunimmt, wie dies Patch 1 erkennen läßt. Solche Patches sollen als starke Sekundärpatches klassifiziert werden. Die zweite Patchausprägung läßt sich bei Patch 2 und 3 erkennen und wird als schwache Sekundärpatches bezeichnet. Diese erreichen ein generell geringeres Flächenniveau, welches zudem von einer deutlichen Seitwärtsbewegung oder gar signifikanten Rückgängen gekennzeichnet sein kann. Sie sind als weniger mechanisch robust zu charakterisieren.

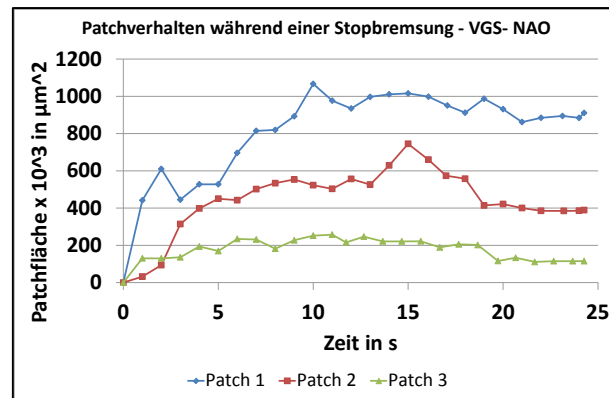


Abb. 7.8: Patchverhalten während einer Stopbremsung, VGS – NAO

Im konkret vorgestellten Fall bedeutet dies, daß (schwache) Patches nach der Initialphase sich nicht zwingend weiter ausdehnen bzw. sie sogar kleiner werden können. Aus Abb. 7.8 ist zu erkennen, daß Patch 2 zunächst recht deutlich wächst, ein Maximum erreicht und dann bis zum Ende der Bremsung, was dem letzten Drittel entspricht, wieder kleiner wird. Patch 3 hingegen verharrt auf einem nahezu konstanten Niveau für die Bremsdauer mit einem leichten Rückgang der Flächenausdehnung im letzten Drittel der Bremsung.

Gut zu erkennen ist indes auch für den Zeitpunkt $t = 35$ s die Zerstörung der Sekundärpatches durch den Druckabfall und die einhergehende Drehzahlerhöhung. Der Druckabfall allein bewirkt hingegen noch keinen Abbau der Sekundärplateaus, wie man zum Zeitpunkt $t = 24,5$ s erkennen kann, so daß von Abschervorgängen gesprochen werden kann. Es ist zu erwarten, daß mit jeder Bremsung die Sekundärpatches durch den Hochlauf (Zentrifugalkräfte in Verbindung mit dem vorliegenden Restbremsmoment) abgetragen werden und sich neu ausbilden. Zu klären ist, wie dies erfolgt: bilden sich vollständig neue Sekundärpatchanordnungen mit jeder Bremsung oder stellen sich vergleichbare und kontinuierliche Konfigurationen der Patches ein? Die Antwort auf die Frage sowie Betrachtungen zu Korrelationen zwischen dem globalen Reibmoment und der Summe der sich bildenden

Sekundärplateaus erfolgt mit der Analyse von Bremssequenzen in Kapitel 7.1.3.

Um die Sekundär- bzw. Verfestigungspatches näher zu charakterisieren, wurden sie physikalisch und chemisch untersucht. In einem ersten Schritt erfolgt eine topographische Analyse (Abb. 7.9), wie sie ebenfalls in Kapitel 8.3 beschrieben wird.

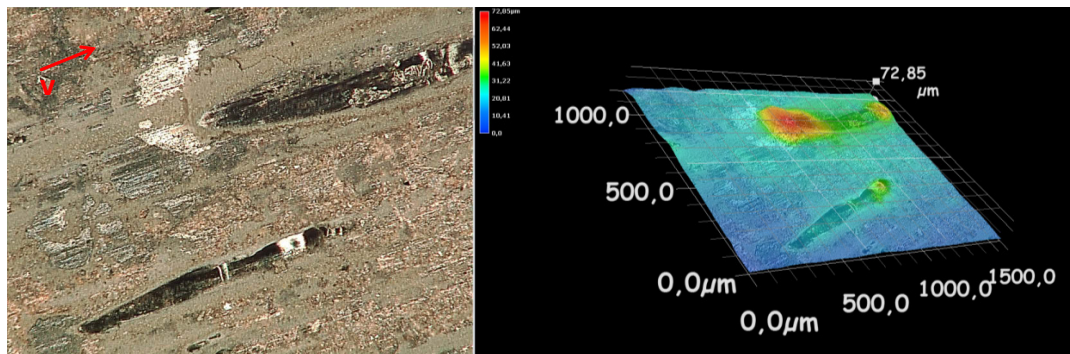


Abb. 7.9: Vergleich mikroskopischer 2D (links) und 3D (rechts) Aufnahmen, jeweils identische Vergrößerung

Es zeigt sich deutlich, daß die Sekundärpatches erhabene Bereiche darstellen und somit die Kontaktbereiche zur Bremscheibe darstellen. Sie partizipieren, zumindest für den betrachteten Reibzonenausschnitt, wesentlich an der Lastübertragung. Für die chemischen Analysen wurde ein Sekundärpatch aus Abb. 7.9, links, mechanisch entfernt. Anhand der REM-Aufnahme (Abb. 7.10, links) ist sehr gut zu erkennen, wie stark der Sekundärpatch verdichtet und kompaktiert ist. Seine Oberfläche wirkt sehr glatt mit nur geringen Rauheiten. Vereinzelt lassen sich anhaftende Abriebpartikel konstatieren. Zum direkten Vergleich ist neben dem Sekundärpatch ein Übergangsbereich lose agglomerierter Partikel zu erkennen, die nicht das komprimierte und verfestigte Stadium erreicht haben.

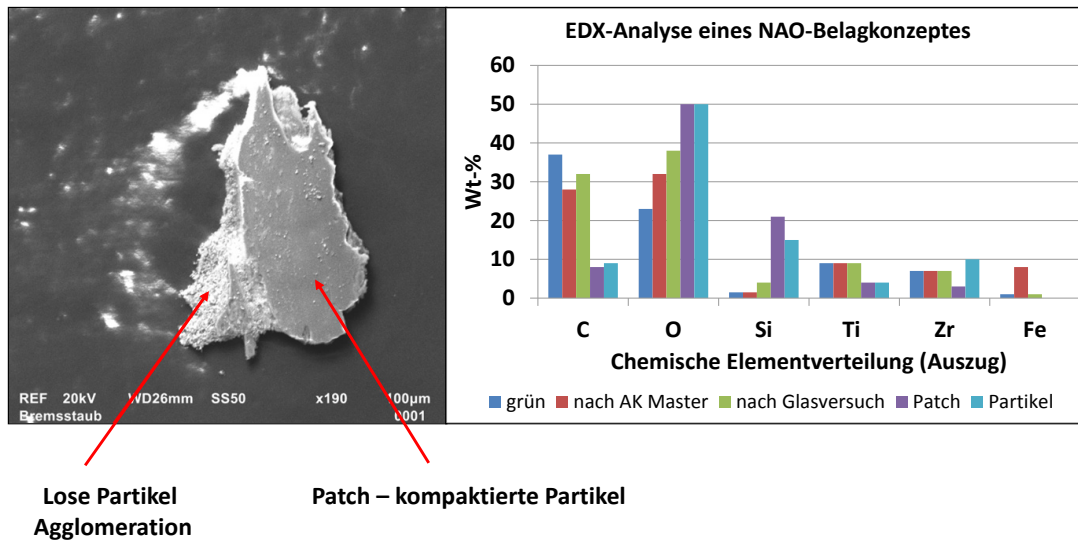


Abb. 7.10: Separierter Sekundärpatch (links) sowie zugehörige chemische Elementverteilungen (rechts)

Die **chemische Analyse** stellt einen Auszug für die Elemente dar, die in deutlichen Konzentrationen vorkommen. Neben der Analyse des Patches sowie benachbarten Bereiches loser Partikel sind die (gemittelten) Ergebnisse des grünen NAO-Belages sowie diejenigen nach dem AK Master und den Versuchen in Kombination mit der VGS dargestellt. Zu erkennen ist eine deutliche Abnahme des Kohlenstoffs zugunsten des Siliziums und Sauerstoffs für die Reibschichtprodukte Sekundärpatch und Partikelagglomeration, was auf die Bildung von SiO_2 schließen läßt. Besonders der Sekundärpatch weist einen erhöhten Siliziumanteil auf, was eine hohe Härte bedeutet und damit auch reibwertstabilisierend wirkt. Dies unterstreicht die Bedeutung für die Lastübertragung und auch die Tatsache, daß die Sekundärpatches mechanisch robust sind. Zirkonium tritt eher als loses Abriebprodukt auf und ist beim Sekundärpatch weniger stark präsent.

Ein Vergleich der Oberflächenstrukturen aus den Glasversuchen mit denen konventioneller Leistungsprüfungen (**AK Master**) ist Abb. 7.11 zu entnehmen. Dies geschieht vor dem Hintergrund, daß mögliche Vergleichbarkeiten und Analogien der Oberflächengestalten aufgezeigt

werden sollen und somit ein Erkenntnistransfer der Glasversuche auf konventionelle Reibpaarungen begründet werden kann. Es zeigt sich, daß gute Übereinstimmungen der tragenden Patchstrukturen (jeweils mit „1“ markiert) hinsichtlich Form und Größenverteilung zu beobachten sind. Auch sind die gerichteten, auf diskreten Gleitbahnen strömenden Verschleißpartikel bzw. deren Strömungskanäle gut erkennbar. Bezüglich der Darstellung der Patches muß ergänzt werden, daß die Analysen des Belages der AK Master-Prüfung mit Hilfe eines Objektives für Hellfeldbetrachtungen (Keyence Z100), die Aufnahmen des Belages der Glasuntersuchungen indes mit einem Dunkelfeldobjektiv (Keyence Z20) erstellt wurden. Daher erscheinen die Patches in Abb. 7.11, links, in einem hellen und in Abb. 7.11, rechts, in einem dunklen Kontrast.

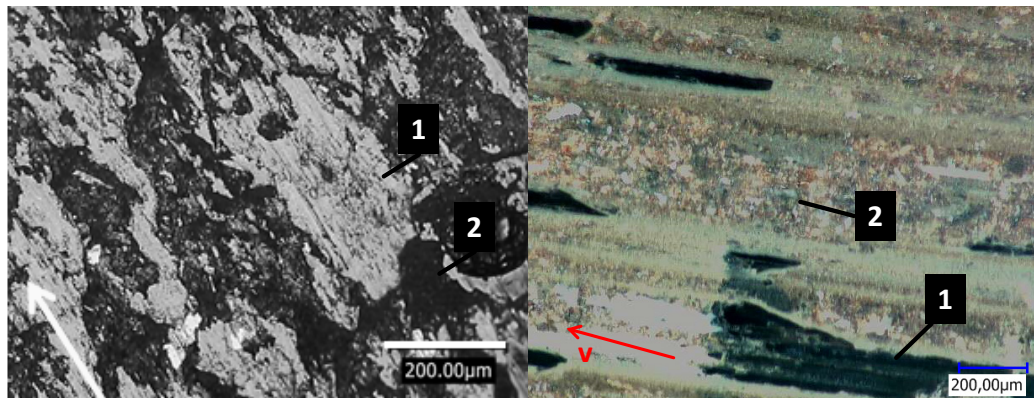


Abb. 7.11: Belagausschnitt NAO nach AK-Master (links), sowie während einer Stopbremsung (Nutzung einer Vollglasscheibe) mit 1 = tragende Plateaustruktur und 2 = Matrix (rechts)

Die Inhomogenitäten weisen im Gegensatz zu den sich ausbildenden Sekundärplateaus deutlich geringere Abmessungen auf und sind ebenfalls deutlich kleiner als typische Primärpatches von ECE-Belägen. Analysen mittels REM / EDX bestätigen, daß es sich um Zirkon-, aber auch Siliziumbestandteile handelt, die entsprechend als Initialkeim fungieren können.

Als Fazit kann festgehalten werden, daß sich das Patchverhalten als Wachstums- und Verlagerungsphase beschreiben läßt, jedoch auch eine

Abnahme der Patchfläche möglich ist. Die Dynamik der Initialphase wird während der Bremsung nicht wieder erreicht und es tritt kein abruptes Auflösen oder Zerfallen der Patches während der Bremsung auf. Die Patchanalysen verdeutlichen, daß die Patches stark kompakt und verfestigt sind und sehr glattflächige Oberfläche aufweisen. Zudem kann ein Materialtransfer von der Scheibe in die Reibschicht nachgewiesen werden. Der Vergleich zu konventionellen Reibprüfungen (AK Master) zeigt, daß die Sekundärpatches in Anzahl, Gestalt und Größe vergleichbar sind. Gleiches gilt für die Partikelbahnen / -kanäle.

Die Analyse des Patchverhaltens des **ECE-kf** Belages für eine komplette Bremsung erfolgt anhand zweier Patches (Abb. 7.12, rote Markierung).

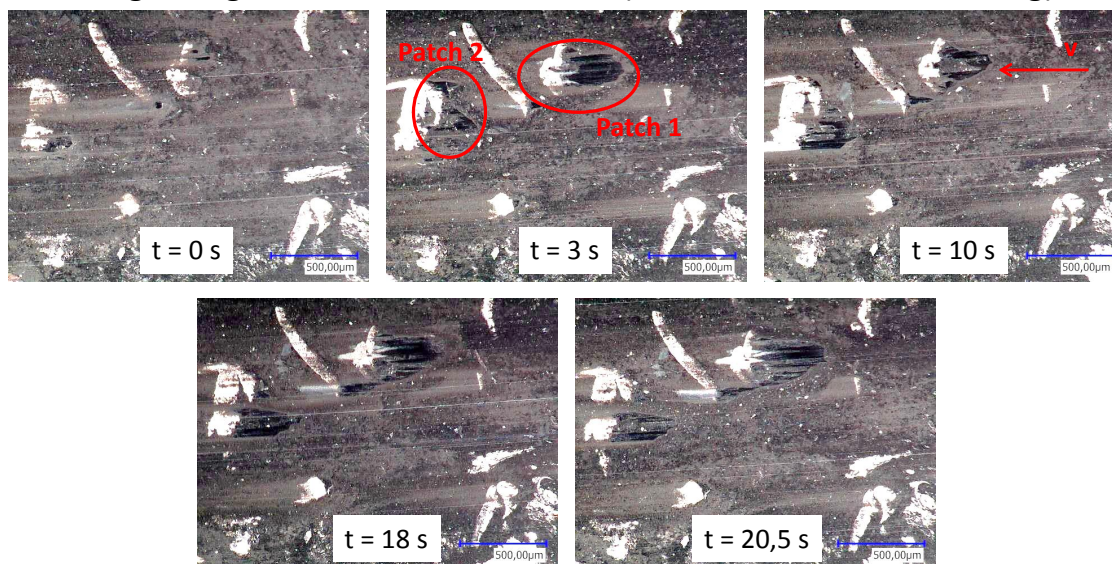


Abb. 7.12: Darstellung der Patchbildung unmittelbar vor der Bremsung bis zum Stillstand eines ECE-kf

Zu Beginn sind die Sekundärpatches nicht zu erkennen. Da es eine Folgebremsung innerhalb einer Sequenz ist, kann festgehalten werden, daß die Sekundärpatches zwischen den Bremsungen offensichtlich (wie bereits beim NAO erkannt) zerfallen bzw. abgeschert werden. Zum Ende der Bremsung (Drehzahl gleich Null) bleiben sie jedoch bestehen, auch wenn der Bremsdruck verringert wird. Die Patches wachsen und werden kleiner

innerhalb der Bremsung. Eine deutliche räumliche Verlagerung besteht indes nicht, da sie stark an die Primärpatches gebunden sind.

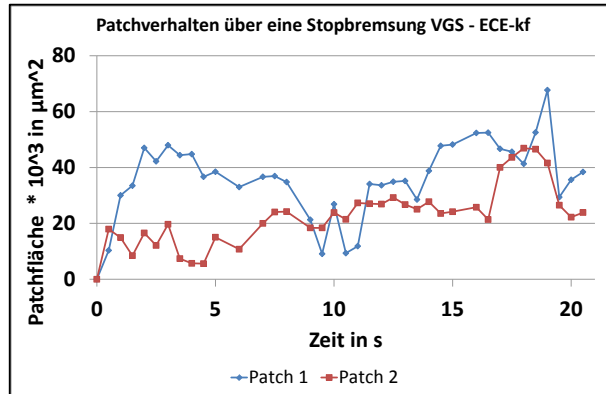


Abb. 7.13: Patchverhalten während einer Stopbremsung, VGS – ECE-kf

Das zeitliche Verhalten ist in Abb. 7.13 dargestellt, wobei die zeitliche Auflösung eine halbe Sekunde beträgt. Das Initialverhalten wurde bereits separat vorgestellt und ist hierbei nicht berücksichtigt. Die Patchflächen fallen deutlich geringer (Faktor 10 bis 15) als beim NAO aus, während die Ausdehnung während der Bremsung stärker als beim NAO zu schwanken scheint. Nach der Initialphase erfährt die Patchfläche über die Bremsungsdauer eine leichte Zunahme. Dieses besondere Verhalten wird als instabiler Patch klassifiziert, da seine flächenhafte Ausdehnung größere Schwankungsbreiten aufweist.

Zwar wird der Partikelstrom verständlicherweise durch die Primärplateaus beeinflusst, jedoch haben auch die sich ausprägenden Sekundärplateaus einen deutlichen Einfluß, wie in Abb. 7.14 zu erkennen ist. Ergänzend sei auf die Abb. 13.13 verwiesen, in der die approximierten Kurven der Patchflächen über die Bremsung dargestellt sind.

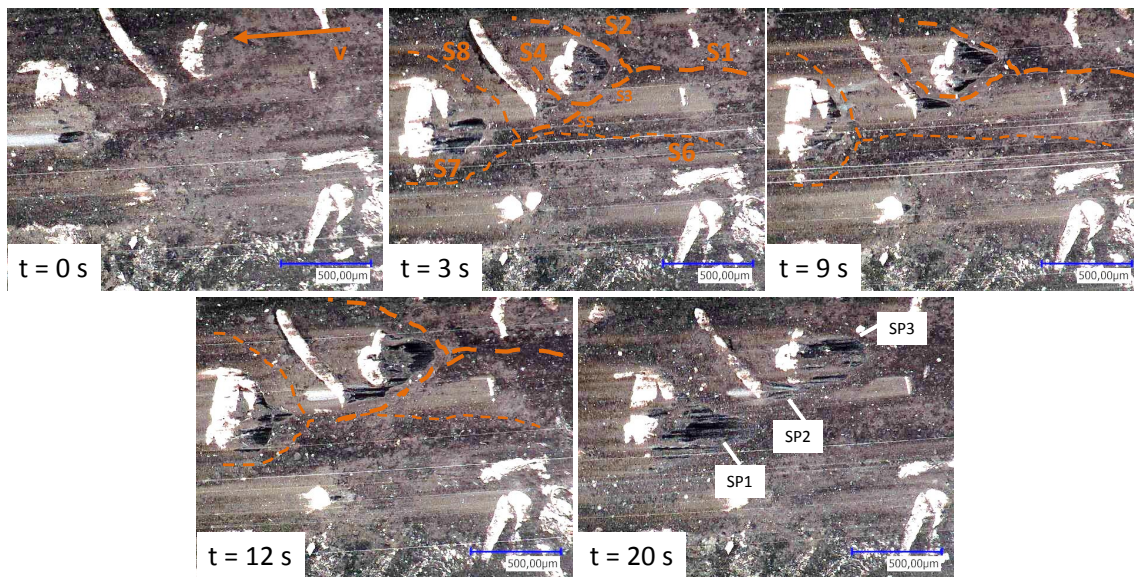


Abb. 7.14: Gegenseitige Patchbeeinflussung während einer Stopbremsung, VGS – ECE-kf

Bei dieser Bremsung stellen sich zwei Hauptpartikelströme (S1 und S6) ein, die für die Entstehung und Ausbildung der Sekundärpatches verantwortlich sind. Zunächst (bei $t = 3$ s) profitiert dabei Patch 1 von zwei separaten Strömen (S5 und S6), die unmittelbar vor ihm zusammentreffen und sich durch den Patch aufsplitten (in S7 und S8). Patch 2 und 3 werden prinzipiell von dem gleichen ursprünglichen Strom gespeist (S1), der sich jedoch jeweils durch die Patches ebenfalls aufteilt bzw. aufgeteilt hat (in S2 und S3 sowie in S4 und S5). Im weiteren wächst Patch 2, so daß der Strom S5 nicht länger besteht, da ihm der Weg versperrt wird, und Patch 1 nur noch durch S6 gespeist wird. Dadurch verringert sich nun seine Ausdehnung und er wird kleiner, bis er ein Minimum erreicht (ca. bei $t = 9$ Sekunden). Die Patches 2 und 3 wachsen indes weiterhin stetig. Bei ca. 12 Sekunden jedoch verschließt sich der Weg für den Partikelstrom S4, da Patch 2 die Lücke zum Primärplateau (an dem sich Patch 3 angelagerte) verschlossen hat. Im weiteren wächst Patch 2 dann ebenfalls nicht weiter, da der Partikelstrom S3 seitlich an ihm vorbei gelangt. Dadurch wird nun jedoch wieder der Strom S3 direkt auf den Sekundärpatch 1 gelenkt, woraufhin er

erneut anwächst. Gezeigt wird mit diesem komplexen Verhalten für den ECE-kf, daß sich die Sekundärpatches nicht allein aufgrund der Partikelströme ausprägen, sondern sie sich auch gegenseitig beeinflussen können. Um ihre Ausdehnung während der Bremsung (Drehzahl größer Null) aufrecht zu erhalten, sind kontinuierliche Partikelströme erforderlich. Reduzieren sich diese, kann die Patchfläche abnehmen, wie dies im Beispiel für Patch 1 gezeigt wurde.

Aufgrund der sehr kleinen Patchabmessungen, insbesondere im Vergleich zu den NAO-Messungen, ist eine Patchseparierung zu Zwecken der **physikalisch / chemischen Analysen** nicht möglich, da die Sekundärpatches nicht händisch als Probe entnommen werden können.

Jedoch erfolgt auch für den ECE-kf-Belag ein Vergleich mit einem chargengleichen Belag, der einen AK Master durchlaufen hat (Abb. 7.15). Die Ausprägung der Patches ist vergleichbar in Form und Dimension. Ebenso sind die Partikeltrajektorien bzw. Strömungskanäle vergleichbar, obgleich dies beim Belag aus dem AK Master nur ex-situ anhand der Belagtopographie festgestellt werden kann. Daraus wird geschlußfolgert, daß die Mechanismen beider Reibpaarungen ähnlich sind, was wiederum eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Visualisierungsmessungen auf die Graugußscheibe erlaubt.

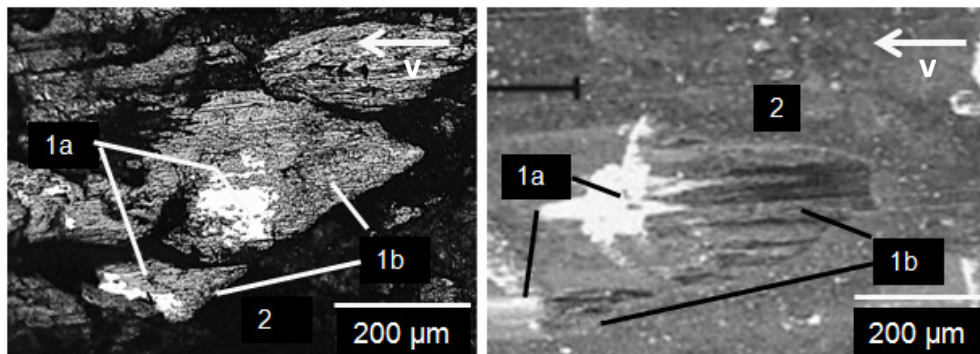


Abb. 7.15: Belagausschnitt eines ECE-kf nach AK-Master (links), sowie während einer Stopbremsung (Nutzung einer Vollglasscheibe) mit 1a = Primärplateau, 1b = Sekundärplateau und 2 = Matrix (rechts)

Es kann für den ECE-kf festgehalten werden, daß es zu einer deutlichen Ausprägung von Sekundärpatches kommt, die stark an die Primärpatches gebunden sind, so daß de facto Verlagerungen nicht stattfinden. Ihre Dimensionen sind deutlich geringer als die der Sekundärpatches beim NAO (Faktor 10..15) und auch die Dynamik des Initialverhaltens ist geringer als beim NAO. Als Besonderheit ist zu bemerken, daß die Dimensionen der Sekundärpatches durch die Partikelströme (direkt) sowie die gegenseitige Beeinflussung durch die Sekundärplateaus selbst (indirekt) bestimmt werden. Kann eine kontinuierliche Versorgung mit Partikeln nicht gewährleistet werden, verringert sich der Patch wieder. In Bezug zum globalen tribologischen Verhalten, welches näher in Kapitel 8.1 vorgestellt wird, sei vorweggenommen, daß der ECE-kf im Vergleich zum NAO höhere Reibmomente bzw. Reibwerte aufweist. Die Dimension der Patches scheint demnach nicht einen proportionalen Einfluß auf das Reibverhalten zu besitzen. Es müssen zudem auch andere Einflußgrößen (wie zum Beispiel das dynamische Partikelverhalten, welches in u.a. Kapitel 7.2 näher beschrieben wird) zur Begründung der Reibwertausprägung berücksichtigt werden. Im Vergleich zum AK Master zeigen sich Analogien bezüglich der Sekundärpatches (Gestalt, Form, Anzahl) sowie der Partikelbahnen / -kanäle, was verdeutlicht, daß eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Versuchen mit der VGS auf konventionelle Reibpaarungen unter Nutzung von Low Steel Belägen zulässig ist.

Auch beim **ECE-mk** sind vor der Bremsung keine Sekundärpatches zu erkennen (Abb. 7.16, $t = 0$ s, rote Markierung), zum Ende ($t = 17$ s, Stillstand bei Bremsdruck $p = 0$ bar) bleiben diese zunächst bestehen. Verlagerungen der Patches der Sekundärplateaus erfolgen über die Bremsung nicht, da sie stark an die Primärplateaus gebunden sind (analog zum ECE-kf). Sie bleiben über die Bremsung robust und stabil, so daß es zu keinem abrupten Zerfall kommt. Aus den Reibzonenaufnahmen läßt sich zudem keine große Dynamik des Patchwachstums erkennen.

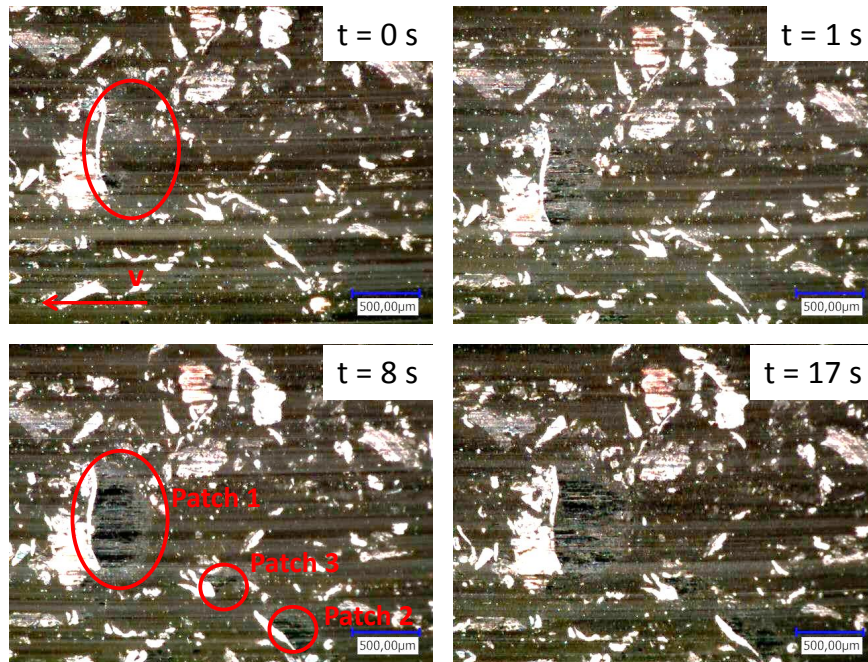


Abb. 7.16: Darstellung der Patchbildung unmittelbar vor der Bremsung bis zum Stillstand (ECE-mk)

In Abb. 7.17 ist das zeitliche Patchverhalten für eine Stoppbremmung des ECE-mk dargestellt, wobei die zeitliche Auflösung für die vollständige Bremsung eine Sekunde beträgt. Das Initialverhalten wurde bereits separat vorgestellt und ist hierbei nicht berücksichtigt.

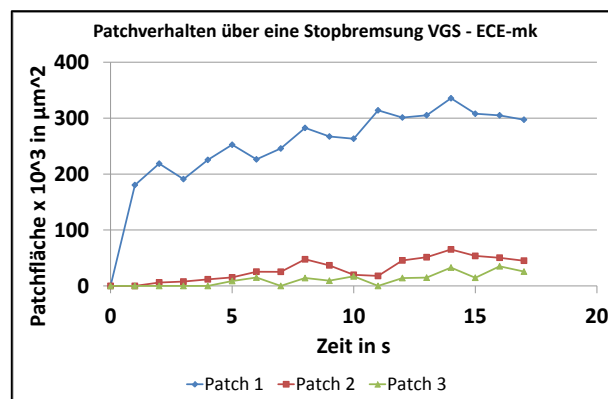


Abb. 7.17: Patchverhalten während einer Stoppbremmung, VGS – ECE-mk

Es können die subjektiven Eindrücke bestätigt werden, daß es zu keinen hochdynamischen, abrupten Änderungen der Patchdimensionen (Zerfall, wie auch Wachstum) kommt. Die größte Dynamik zeigt die Initialphase,

während die Patchflächen kontinuierlich zunehmen. Die Dimensionen fallen dabei jedoch sehr unterschiedlich aus und können sich auf einem vergleichbaren Niveau wie beim NAO bewegen. Damit zeigt der ECE-mk dem NAO ein durchaus vergleichbares Verhalten während der Initialphase, in Bezug auf die Patchdimensionen und auch auf die qualitative zeitliche Entwicklung der Patchflächen. Die Patches werden demnach auch als starke (Patch 1) und schwache (Patch 2 und 3) klassifiziert.

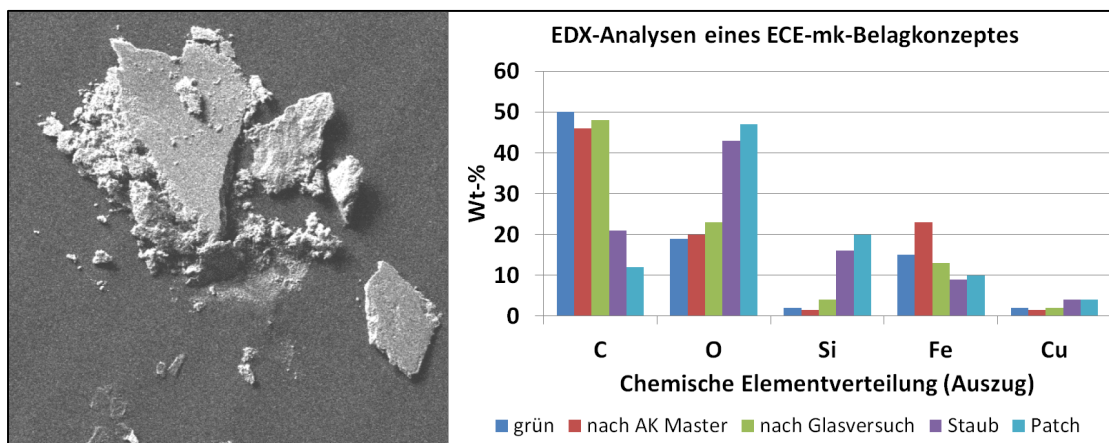


Abb. 7.18: Separierter Sekundärpatch (links) sowie zugehörige chemische Elementverteilungen (rechts)

Aufgrund der in ihren Dimensionen größeren Sekundärpatches ist eine mechanische Separierung gelungen, so daß **physikalisch / chemische Analysen** vorgenommen werden konnten. Die Gestalt des Patches ähnelt der des NAO: kompaktiert, sehr glattflächig und zum Teil mit losen Abriebpartikeln übersät. Auch begrenzen lose Partikelagglomerationen den Patch. Die Gegenüberstellung der EDX-Analyseergebnisse verdeutlicht den Charakter des dritten Reibkörpers im direkten Vergleich zur Reibmatrix. Der Sauerstoffanteil nimmt deutlich zu, ebenso wie der Siliziumanteil. Damit wird nicht nur der Materialtransfer von der Scheibe deutlich (wie ihn auch der Belag nach dem AK Master aufweist: der Eisenanteil wurde durch die Graugußscheibe deutlich erhöht), sondern auch klar, daß die Sekundärpatches eine hohe mechanische Festigkeit besitzen und demnach relevant für die Reibkraftübertragung sein sollten.

Während der Eisenanteil geringer ausfällt, scheint sich das Kupfer leichter aus der Matrix zu lösen und als Bestandteil der Sekundärpatches zu fungieren. Dies erhöht die Temperaturstabilität und schützt den Patch.

7.1.3 Bremssequenz

Nachdem das Verhalten des **NAO** während einer singulären Bremsung vorgestellt wurde und es sich zeigte, daß die Sekundärpatches mit dem Hochlauf für eine Folgebremung abgetragen werden, soll nun eine Bremssequenz näher untersucht werden. Die Darstellungen der Reibzone zum Ende einer jeden Stoppbremung sind in Abb. 7.19 zu erkennen. Es kann konstatiert werden, daß sich die ausbildenden Patches zwischenzeitlich verlagern können, sie sich jedoch an den robusteren Inhomogenitäten immer wieder ausbilden, da diese auch über längere Bremssequenzen bestehen bleiben. Dies beantwortet die in Kapitel 7.1.2 gestellte Frage nach der Ausprägung der Sekundärpatchanordnungen für aufeinanderfolgende Bremsungen insofern, als daß sich eben nicht vollständig neue Patchkonfigurationen, sondern vergleichbare und kontinuierliche Ausprägungen etablieren. Zu bemerken ist in diesem Zusammenhang, daß die Plateaus nach jeder Bremsung mit dem Hochdrehen des Dynos abgetragen bzw. abgeschert werden. Sie können demnach klar als Sekundärpatches charakterisiert werden. Die Patches können unterschiedliche Ausdehnungen und Flächen annehmen, sich aber auch vereinen, wie ein Vergleich der Bremsungen 1 und 2 mit der Bremsung 4 verdeutlicht. Die beiden zunächst unabhängigen Patches (da zwei separate, unterschiedliche Inhomogenitäten vorliegen) vereinigen sich zu einem großen Patch. Solche Erkenntnisse wurden von bisherigen Untersuchungen bislang noch nicht erarbeitet bzw. von bisherigen Modellansätzen berücksichtigt und stellen demnach einen wichtigen Neuheitswert in Bezug auf die Vorgänge in der Reibzone dar. Auch sei bemerkt, daß die bedeckten Flächen (Patchflächen) nicht zwingend mit dem globalen, integral bestimmten Reibmoment korrelieren müssen. Bei Bremsung 5 zeigt sich ein

höheres Moment am Ende der Bremsung als bei Bremsung 4, wohingegen die Patchfläche geringer ausfällt als bei der Bremsung zuvor (Abb. 13.14).

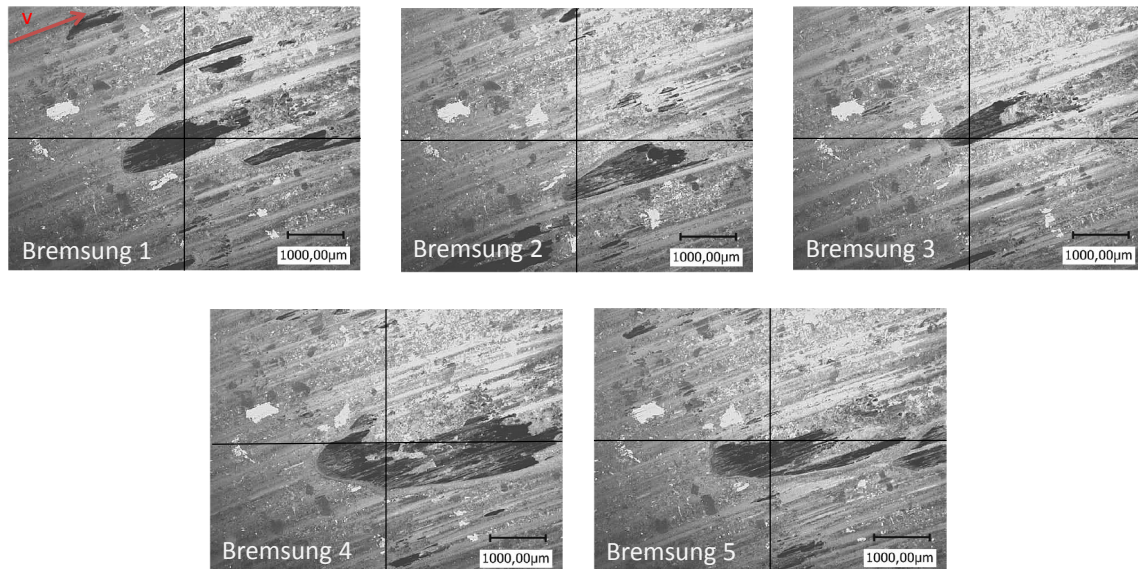


Abb. 7.19: Patchausprägung zum Ende einer jeden Stopbremsung (NAO-Belag)

Die zuvor formulierte Zielstellung, aus den lokalen Patchverhältnissen auf die globalen Reibparameter zu schließen, läßt sich zumindest für die untersuchten Beispiele an NAO-Belägen zunächst nicht erfüllen.

Dennoch sollen die sich einstellenden Patches nun im weiteren näher charakterisiert werden, indem ihre Fläche ermittelt wird (Abb. 7.20). Ausgewertet werden die Flächen für jeweils drei Patches einer Bremsung sowie deren aufsummierte Patchfläche. Ein direkter Vergleich dreier Folgebremungen verdeutlicht zudem das Verhalten für ein Bremskollektiv. Da eine direkte Vergleichbarkeit und Zuordnung der Patches für die einzelnen Bremsungen angestrebt werden soll, wird die gewählte Anzahl von drei Folgebremungen als ausreichend und zielführend erachtet.

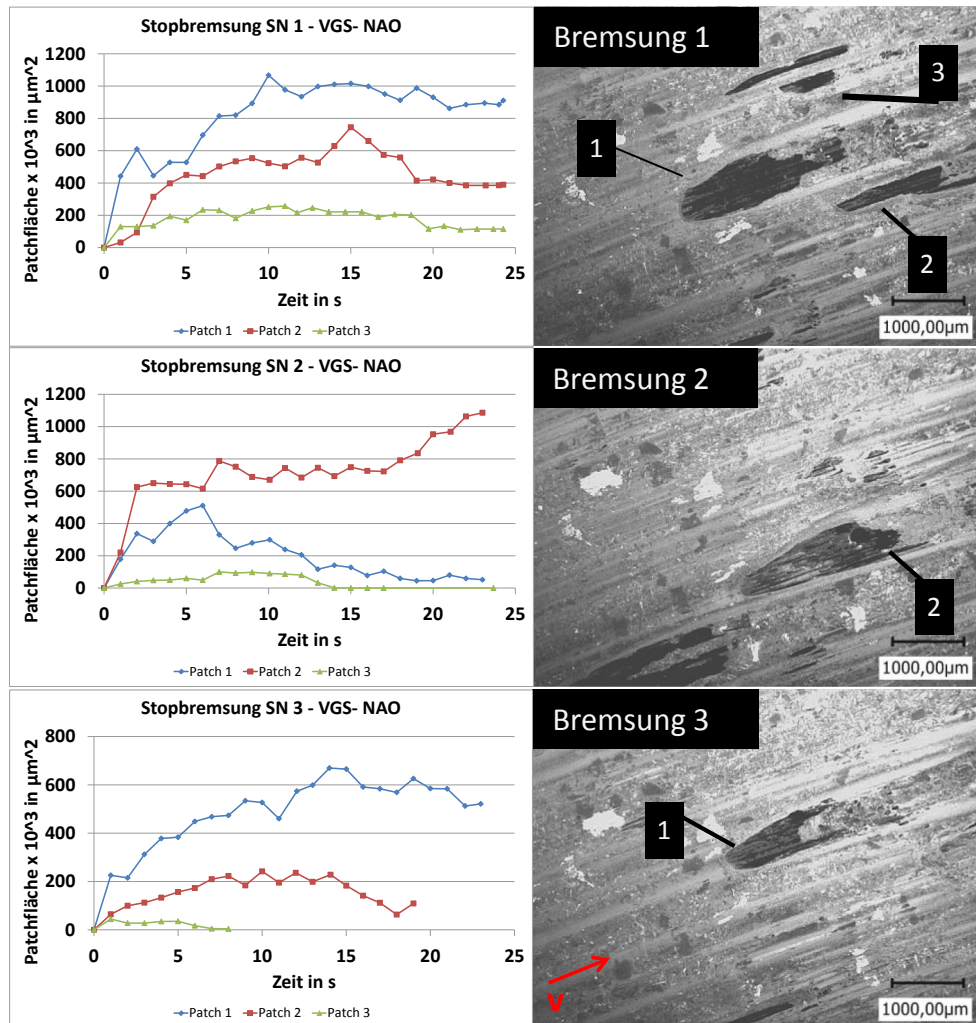


Abb. 7.20: Patchanalysen für drei Folgebremungen und jeweils 3 Patches (NAO-Belag)

Für die sich ausbildenden Patchflächen wird ein degeneratives Verhalten festgestellt. Zunächst erfolgt zumeist ein schneller und deutlicher Anstieg, der sich anschließend verlangsamt. Auch kann ein Abbau der Patchfläche erfolgen, der bis zum vollständigen Verschwinden des Patches führen kann. Die Änderungen der Patchfläche erfolgen über die Bremsung betrachtet nicht abrupt und nur mit einer geringen Schwankungsbreite. Absolut betrachtet können sich zum Teil jedoch innerhalb einer Bremsung deutliche Unterschiede bezüglich der Fläche eines Patches einstellen. Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß Patches innerhalb einer Bremssequenz in

ihren Dimensionen kleiner werden und sogar fast vollständig zerfallen können, um bei einer folgenden Bremsung wieder bedeutsame Ausmaße anzunehmen. Patch 1 verdeutlicht dies sehr gut: in Bremsung 1 wächst er kontinuierlich und dominiert den betrachteten Ausschnitt. In Bremsung 2 steigt er abermals sehr dynamisch an, um zum Ende der Bremsung jedoch fast völlig zu zerfallen. Im anschließenden Bremsschritt (Schrittnummer SN 3) ist ein Verhalten analog zu SN 1 mit einem dynamischen Anstieg und einem danach einsetzenden kontinuierlichen Wachstum zu erkennen, was schließlich eine für den Analyseausschnitt dominierende Rolle bedeutet. Betrachtet man die summierte Patchfläche (Abb. 7.21, links), zeigt sich für sämtliche Bremsungen ein degressiver Verlauf, der durch einen deutlichen Anstieg (schnelle Flächenzunahme) zu Beginn der Bremsung gekennzeichnet ist. Anschließend erfolgt eine mehr oder weniger gleichmäßig verlaufende Seitwärtsbewegung.

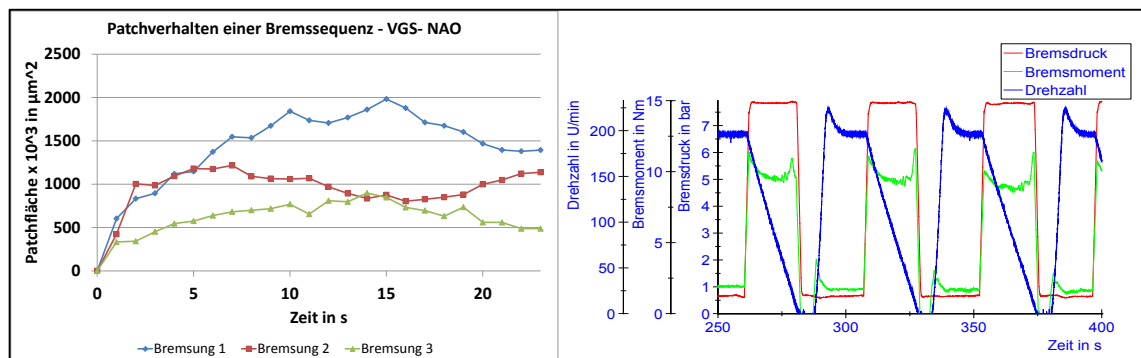


Abb. 7.21: aufsummierte Fläche von drei Plateaus an gleicher Meßstelle über drei Bremsungen (links), Verläufe des globalen Reibmoments, Drehzahl sowie Bremsdruck (rechts), VGS – NAO

Die Summe aller Patches des visualisierten Bereichs ist demnach für die hier betrachteten Bremsungen nahezu konstant. Unterschiedliches Verhalten mit eindeutigen Trends in Bezug auf das Reibmoment (Abb. 7.21, rechts) kann für die drei Folgebremungen nicht ausgemacht werden.

Die Betrachtung der Reibzonenausschnitte zum Ende von vier aufeinanderfolgenden Bremsungen (Drehzahl sowie Bremsdruck sind gleich Null) in Abb. 7.22 verdeutlicht für den **ECE-kf**, daß die Sekundärpatches

zunächst erhalten bleiben. Ihre Ausprägung ist jedoch verschieden, da sie unterschiedliche Dimensionen annehmen und sogar zwischenzeitlich verschwinden können, um anschließend in einer Folgebremmung wieder zu erscheinen. Da die Sekundärplateaus sehr deutlich an die Primärpatches gebunden sind, können keine Verlagerungen festgestellt werden.

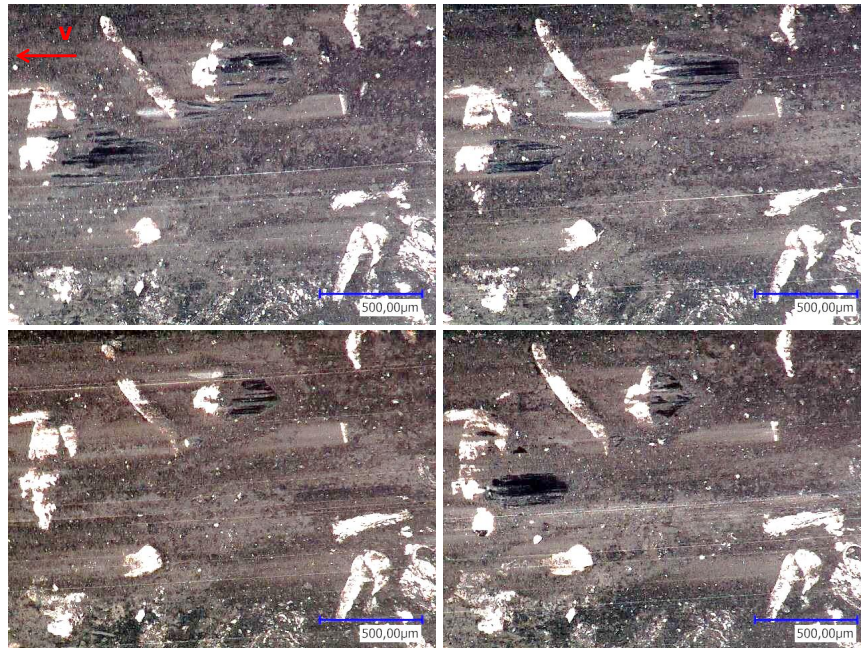


Abb. 7.22: Patchausprägung zum Ende einer jeden Stoppbremmung (ECE-kf-Belag)

In Abb. 7.23 werden jeweils drei Patchflächen (Sekundärplateaus) innerhalb einer Bremsung und für drei aufeinanderfolgende Bremsungen dargestellt.

Dabei fällt auf, daß sich die Plateauflächen vergleichbar zu den Betrachtungen der Einzelbremsung verhalten und zwischen starken und schwachen Patches unterschieden werden kann. Obgleich sehr dynamische Veränderungen erfolgen, ist ein abrupter vollständiger Zusammenbruch der Patches, wie auch beim NAO-Belag, nicht zu beobachten.

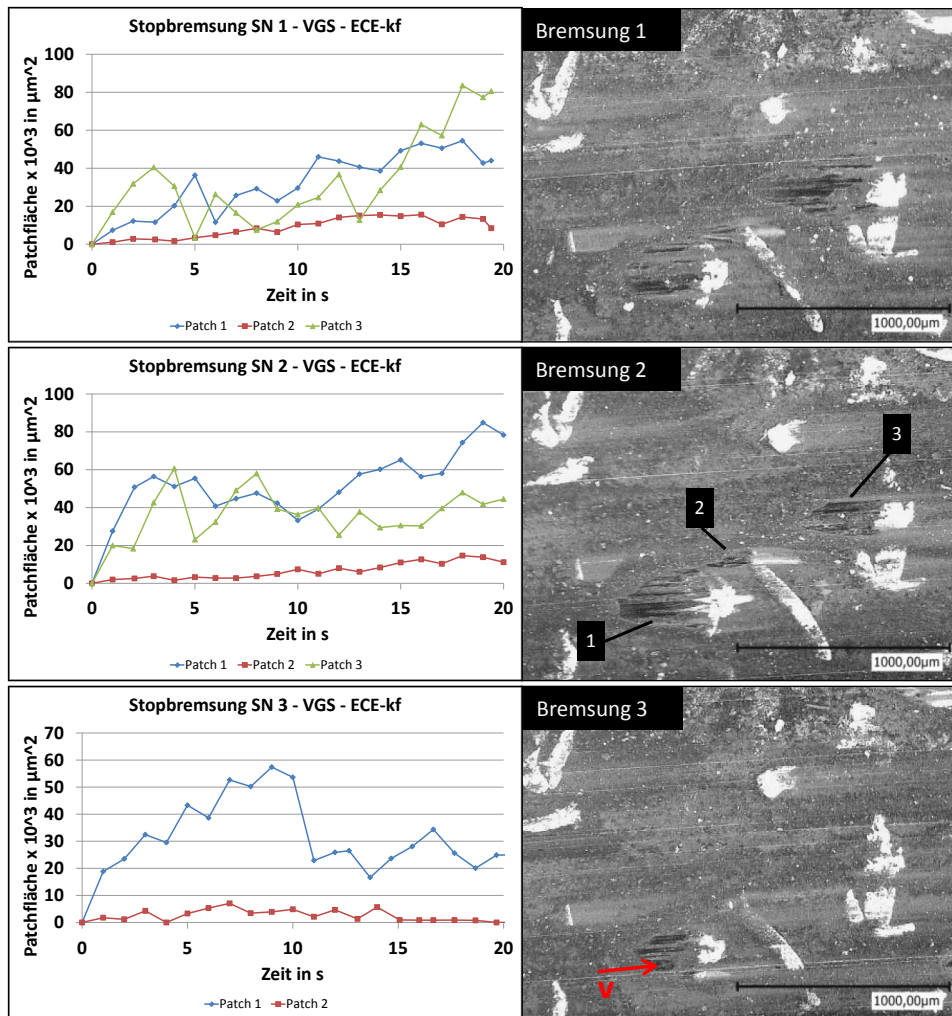


Abb. 7.23: Entwicklung der Patchfläche des ECE über drei Stoppbremsungen (links), Bilder am Ende der Bremsung bei $v = 0 \text{ m/s}$ (rechts)

In Abb. 7.24 sind die aufsummierten Patchflächen dargestellt. Im Gegensatz zum NAO stellen sich keine deutlichen Verlagerungen, wohl aber Veränderungen der Patchflächen ein, die zudem beim ECE-kf eine höhere Dynamik erkennen lassen.

Dabei ist die Schwankungsbreite relativ betrachtet (nicht in absoluten Zahlen) höher als beim NAO. Nach einem recht schnellen und deutlichen Anstieg der aufsummierten Patchflächen (analog zu den jeweiligen einzelnen Patchflächen) stellt sich zunächst eine Seitwärtsbewegung der Kurven dar. Ab zirka 10 s Bremsdauer zeigen indes die ersten beiden

Bremungen eine leichte Zunahme der Patchfläche, während die dritte Bremsung eine leichte Abnahme aufweist, was auf eine bevorstehende Reibringverlagerung schließen lassen kann. Eine abrupte, deutliche Reduktion der aufsummierten Patchfläche erfolgt analog zum NAO nicht. Zudem offenbaren die beiden ersten Bremsungen ein geringfügig höheres Reibmoment als die letzte Bremsung, deren summierte Patchfläche geringer ausfällt. Dies mag zwar einen Zusammenhang zwischen den Ereignissen im betrachteten Reibzonenausschnitt mit dem globalen Momentenverlauf vermuten lassen. Es wird jedoch erwartet, daß die Abmessungen der lokalen Betrachtungen zu gering sind, als das sie als repräsentativ für die vollständige Reibzone gelten dürfen.

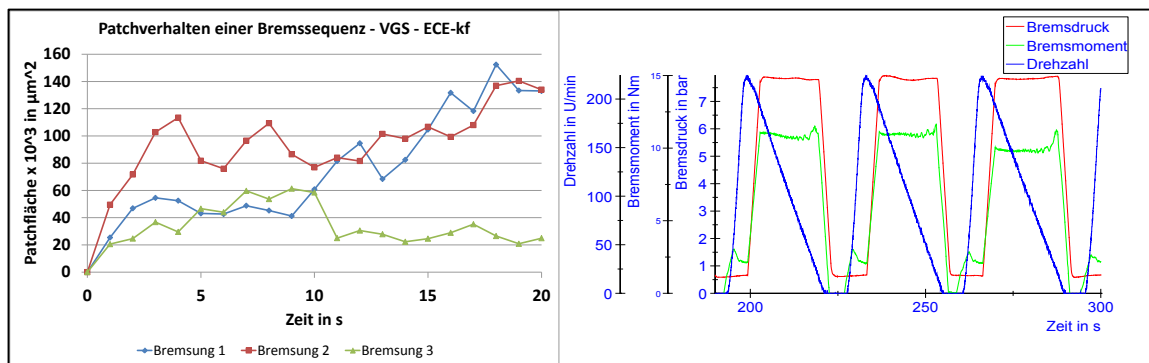


Abb. 7.24: aufsummierte Fläche von drei Plateaus an gleicher Meßstelle über drei Bremsungen (links), Verlauf des globalen Reibmoments, Drehzahl sowie Bremsdruck (rechts), VGS – ECE-kf

Auch beim **ECE-mk** bleiben die Sekundärplateaus nach erfolgter Einzelbremsung (und vor dem Hochlauf für die folgende Stopbremsung) bestehen. Analog zum ECE-kf sind sie an die Primärpatches gebunden, so daß Verlagerungen nicht festgestellt werden können. Die Betrachtung der Aufnahmen der Reibzonenausschnitte in Abb. 7.25 läßt vermuten, daß die Patches über die Bremsung anwachsen und am Ende relativ groß in ihren Abmessungen ausfallen.

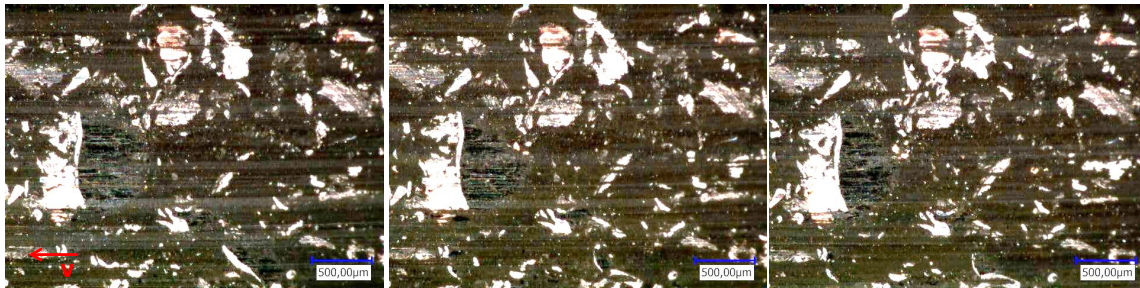


Abb. 7.25: Patchausprägung zum Ende einer jeden Stopbremsung (ECE-mk-Belag)

Die Bestimmung der aufsummierten Patchflächen bestätigt diesen zunächst subjektiven Eindruck auch anhand objektiver Zahlenwerte, wobei das Verhalten dabei eher dem NAO als dem ECE-kf ähnelt (Abb. 7.26).

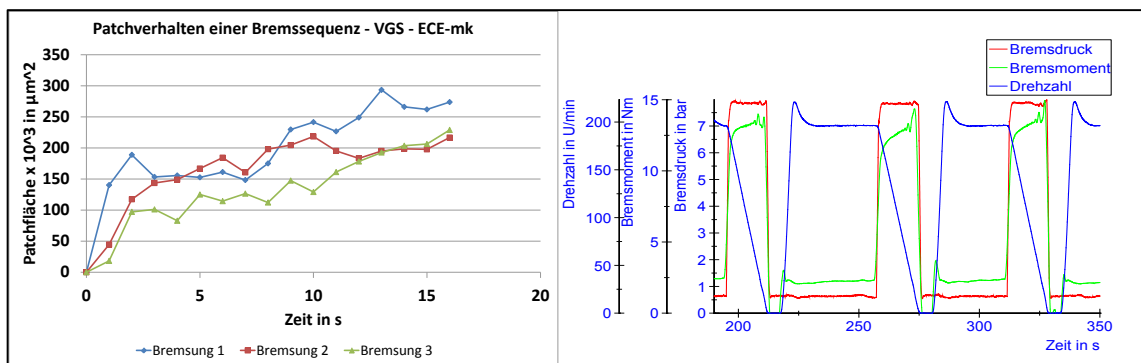


Abb. 7.26: aufsummierte Fläche von drei Plateaus an gleicher Meßstelle über drei Bremsungen (links), Verlauf des globalen Reibmoments, Drehzahl sowie Bremsdruck (rechts), VGS – ECE-mk

Nach einer dynamischen Initialphase (deutliches Patchwachstum) wachsen die Patches zwar langsamer, jedoch beständig, was sie als starke Sekundärpatches klassifiziert. Abrupte, dynamische Veränderungen sind nicht festzustellen. Das Niveau der Dimensionen ist dabei für alle drei Bremsungen recht ähnlich und die erzielten Patchflächen sind größer als beim ECE-kf, erreichen jedoch nicht ganz das Niveau des NAO.

Auch wenn ob der Größe des betrachteten Reibzonenausschnittes Korrelationen zum globalen Reibverhalten schwerfallen mögen, kann doch zumindest für den ECE-mk eine Übereinstimmung erkannt werden. Zwar zeigt sich keine Momentenüberhöhung in Form eines Initial Bites (Bem.: die

Patchwachstumsdynamik der Initialphase ist geringer als die des NAO), das mit der Bremsung steigende Reibmoment korreliert jedoch gut mit der wachsenden Sekundärpatchfläche.

Als Indizien für die Unterschiede in den globalen Reibmomentenverläufen sind besonders die sich einstellenden Patchflächen und die Dynamik der Änderung der Patchflächen zu nennen, wobei besonders die Initialdynamik der Patchbildung eine wichtige Rolle spielt. Neben den Patches fällt jedoch auch dem Partikelverhalten eine zentrale Rolle zu, welches im anschließenden Teilkapitel als lokales Partikelverhalten vorgestellt wird.

7.2 Lokales Partikelverhalten

Im Rahmen der Partikelanalysen geht es um die Detektion und Verfolgung sowie die sich daraus ableitende Bestimmung des dynamischen Bewegungsverhaltens von Abriebpartikeln in der Reibzone, um mögliche Korrelationen zum (globalen) tribologischen Verhalten sowie Interaktionen zwischen Partikeln und Patches beschreiben zu können. Für möglichst kontinuierliche Randbedingungen werden ausschließlich Schleppbremsungen vorgesehen. Genutzt werden die bereits vorgestellte Vollglasscheibe aus Borosilikatglas in Verbindung mit den drei Reibelagkonzepten. Als Parameter der optischen Sensorik sind vordergründig die Vergrößerung, 150 x und 200 x, sowie die Abtastraten von 1000 fps zu nennen. Da die Partikel der Reibschicht bzw. auf der Belagoberfläche detektiert werden sollen, reicht die Abtastrate von 1000 fps aus, weil sich die Partikel wesentlich langsamer bewegen. Die Messungen erfolgten an ausgewählten Bereichen der Reibzone, die an der Kraftübertragung beteiligt sind und wo sich entsprechende Abriebpartikel bilden.

Für die konkrete Umsetzung der Partikelanalysen wurden verschiedene kommerzielle, aber auch freeware Produkte im Hinblick auf ihre Tauglichkeit untersucht. In Abb. 7.27 sind exemplarisch die Detektions- bzw. Verfolgungsqualitäten dreier verschiedener Programme sowie einer automatischen und manuellen Objektverfolgung gegenübergestellt.

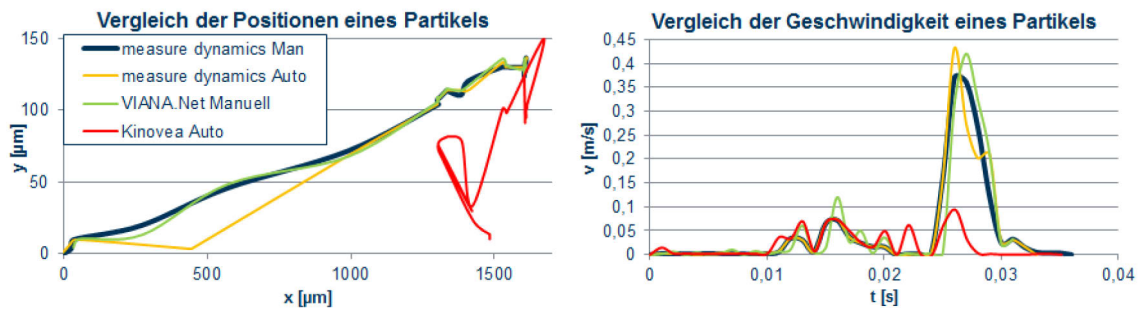


Abb. 7.27: Vergleich der Partikelposition (links) und Partikelgeschwindigkeit (rechts) für verschiedene Analyseprogramme bzw. -modi

Es offenbaren sich zum Teil deutliche Unterschiede, die zu beträchtlichen Fehlinterpretationen führen. Dies liegt im wesentlichen in den automatischen Detektions- und Verfolgungsalgorithmen begründet. Das dabei größte Problem stellen Fehldetektionen dar, bei denen benachbarte Partikel anstelle des Zielpartikels weiterverfolgt werden. Daher sind besonders manuelle Eingriffsmöglichkeiten wichtig. Die Betrachtung der Geschwindigkeitsverläufe zeigt ebenso deutliche Unterschiede hinsichtlich der einzelnen Programme, wie auch der Modi. Ebenfalls wird deutlich, daß ein manueller Eingriff allein nicht ausreicht, um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen, wie die Unterschiede zwischen measure Dynamics und VIANA.NET verdeutlichen (vergleiche auch Abb. 7.27).

Aus den gewonnenen Erfahrungen hat sich gezeigt, daß mittels Measure Dynamics die besten Ergebnisse in vertretbaren zeitlichen Umfängen erzielt werden, weshalb dieses Programm für die Analysen des lokalen Partikelverhaltens Verwendung findet. Als Detektionsmodus wird ein semi-automatischer Ansatz gewählt. Dieser erlaubt es, die Partikel zunächst automatisch verfolgen zu lassen. Die Verfolgung wird dabei vom Nutzer überwacht, so daß er gegebenenfalls manuell eingreifen kann, falls Fehldetektionen auftreten sollten.

Eingangs der Analysen ist eine Videobearbeitung erforderlich, um die Kontrastverhältnisse zu optimieren. Somit ist es möglich, mit Hilfe kombinierter Filterkonzepte eine Bildinvertierung, Graustufendarstellung

sowie eine Anpassung von Helligkeit und Kontrast (IGBC) vorzunehmen. Eine beispielhafte Videoaufbereitung ist in Abb. 13.15 dargestellt.

Mit dieser adaptierten Methodik und den auf diese Weise aufbereiteten Videodaten lassen sich einzelne Partikel ab einem Durchmesser größer 5 μm dezidiert detektieren und verfolgen. Exemplarisch ist die Nachverfolgung mehrerer Partikel in Abb. 7.28 gezeigt.

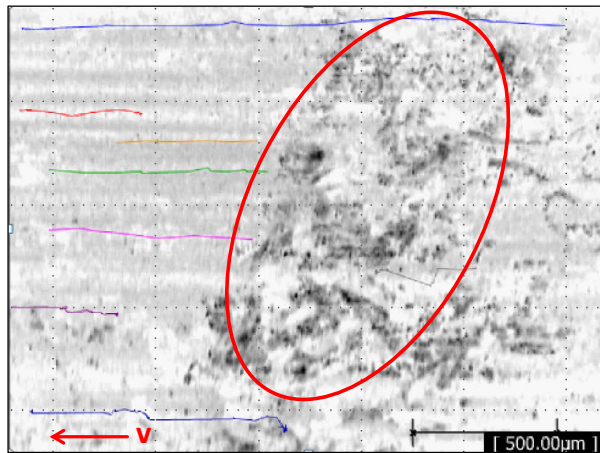


Abb. 7.28: Beispielbild einer Partikelanalyse und Darstellung verschiedener Partikeltrajektorien

Zu erkennen ist deutlich ein sehr breit verlaufendes Primärplateau (rote Markierung), in dessen Schatten sich jedoch auch Partikel lösen können. Die Trajektorien dreier Partikel (gelb, grün, rosa) verdeutlichen dies. Die Bewegung der Partikel verläuft von rechts nach links im Bild entsprechend der Drehrichtung der Bremsscheibe. Zu erkennen ist, daß die nachverfolgbaren Wege unterschiedlich lang ausfallen. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Beginn der Verfolgung bzw. die Detektierung. Sie kann mit zwei Szenarien einsetzen. Zum einen kann sich der Partikel zu Beginn der Detektion aus der Belagmatrix herauslösen. Zum anderen ist es möglich, daß der Partikel mit der Scheibendrehzahl (oder auch langsamer) strömt und bereits vor dem Detektionszeitpunkt aus der Matrix gelöst wurde.

Im Ergebnis wird das dynamische Partikelverhalten zunächst über die sich einstellenden Partikelbahnen charakterisiert, um einen Überblick über die

Belagoberflächenzustände und deren Auswirkungen auf die Partikelbewegungen zu erhalten. Im weiteren werden die ermittelten Größen, Geschwindigkeiten und Bewegungszeiten der Partikel, untersucht. Schließlich werden die Möglichkeiten der Partikelanalyse unter Nutzung einer segmentierten Graugußscheibe diskutiert.

7.2.1 Charakterisierung von Partikelbahnen

Für die Analyse der Partikelbahnen werden Schleppbremsungen vorgesehen, um eine konstante Relativbewegung zwischen der Vollglasscheibe und dem jeweiligen Reibbelag zu gewährleisten.

Die Untersuchungen des **NAO-Belages** verdeutlichen, daß die Partikelströme sich auf diskreten Bahnen bzw. in Kanälen bewegen. Ablenkungen sind möglich, erfolgen jedoch meist nur in geringem Maße. Es können größere Einzelpartikel sowie ein breiartiger Fluß von Kleinstpartikeln erkannt werden. Die bei diesem NAO typischen Kohlenstoffbereiche (die als ein Primärplateau wirken) können Partikel ablenken. Mit zunehmendem Verschleiß und / oder verringerten Flächenpressungen können diese aber auch von einem breiartigen Partikelstrom überspült werden (Abb. 7.29). Begründet wird der im Bedding höhere Anteil an Mikropartikeln mit dem Fehlen der (schützenden) Reibschicht sowie der Belagoberflächentopographie, bei der sich stärker abgelenkte Partikelbahnen einstellen. Dies erhöht den abrasiven Verschleiß und bewirkt größere Partikel. Im eingelaufenen Zustand liegt eine etablierte Reibschicht vor und die Oberfläche ist eingeebnet, so daß sich geradlinigere Partikelbahnen ergeben. Dadurch verringert sich die Größe der Partikel und breiartige Ströme stellen sich ein. Dabei sind die einzelnen Kleinstpartikel nicht optisch separierbar, wohl kann jedoch der Partikelstrom über in ihm befindliche größere Partikel charakterisiert werden. Es ist neben dem Verschleißzustand (Einebnung von topographischen Unebenheiten) jedoch auch die Kontaktsituation entscheidend.

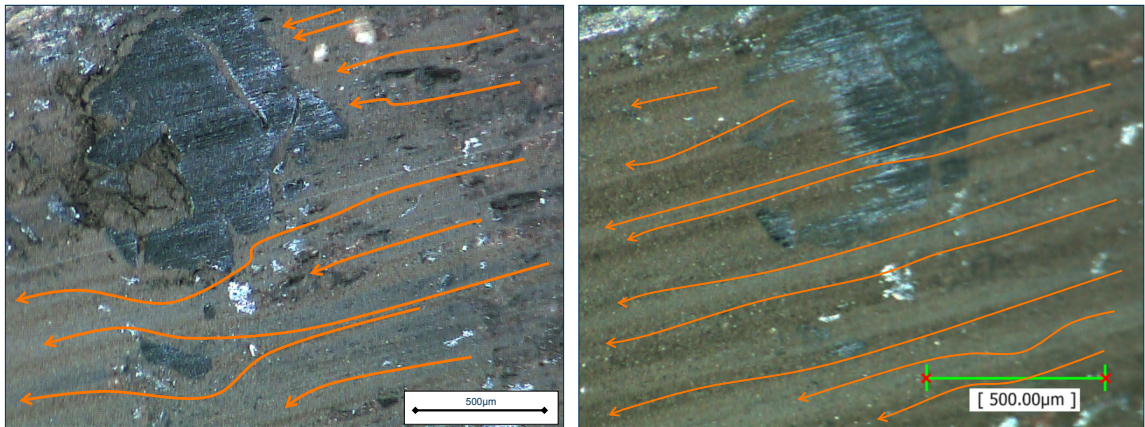


Abb. 7.29: Kohlenstoffpatch und die sich einstellenden Partikelbahnen während der Initialphase (links) sowie bei fortgeschrittener Belastungsdauer (rechts), NAO-Belag, $n = 300$ U/min bzw. $v = 2,5$ m/s

Im gezeigten Beispiel verlaufen zwar die Partikelbahnen in Abb. 7.29 (rechts) sehr viel geradliniger und es erfolgen weniger Ablenkungen der Partikel, jedoch ist die mittlere Partikelgeschwindigkeit mit $0,044$ m/s geringer als in der betrachteten Initialphase mit $0,065$ m/s. Der Grund liegt in der geringeren Flächenpressung, die bedeutet, daß die Scheibe leicht angehoben wird und die Überspülungen erfolgen können. Dadurch sinken auch die mittleren Partikelgeschwindigkeiten, da sich der Kontakt zwischen Scheibe und Partikeln verringert.

In Abb. 7.30 ist gut die für den NAO typische Ausprägung von Sekundärplateaus, die in verschiedenen Dimensionen auftreten können, zu erkennen. In diesen Fällen, wenn sich sehr kleine, jedoch auch Sekundärplateaus mit großen Dimensionen ausprägen, ist die Reibzone nicht von breiartigen Strömen überspült, sondern es prägt sich eine charakteristische Reibschicht auf dem Belag aus. Die Voraussetzung hierfür sind in jedem Fall hohe Flächenpressungsverhältnisse. Für den Aufbau der Patches sind die großen Partikel (Partikeldurchmesser größer $5 \mu\text{m}$) verantwortlich, während die Kleinstpartikel den Größeren folgen und den Patchaufbau ergänzen.

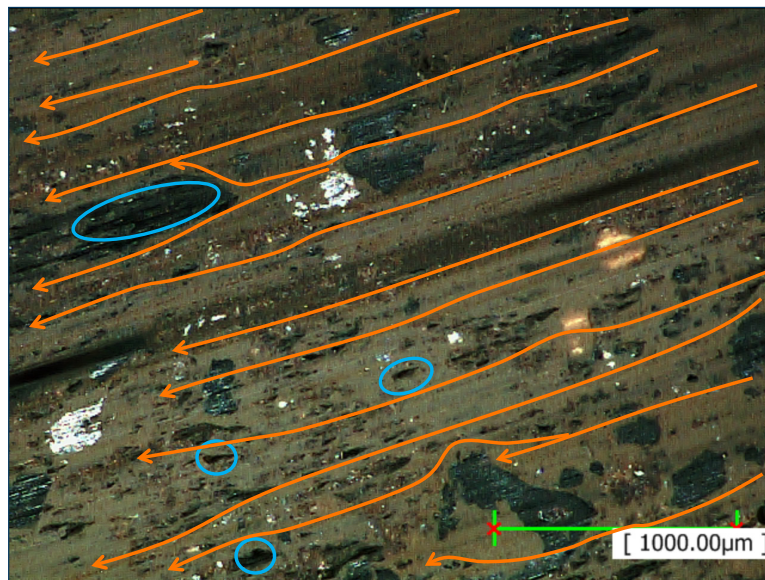


Abb. 7.30: Ausprägung von Sekundärplateaus (blaue Markierung) und deren Einfluß auf Partikelbahnen, NAO-Belag, $n = 200$ U/min bzw. $v = 1,65$ m/s

Bei dem **ECE-kf Belag** bewegen sich die Partikel ebenfalls auf diskreten Bahnen. Dies kann zuweilen recht geradlinig (sofern die Primärplateaudichte gering ausfällt bzw. diese durch Verschleiß abgebaut wurden) erfolgen. Hinter den Patches (Primär- und Sekundärpatches) ergeben sich abgeschattete Bereiche (Abb. 7.31).

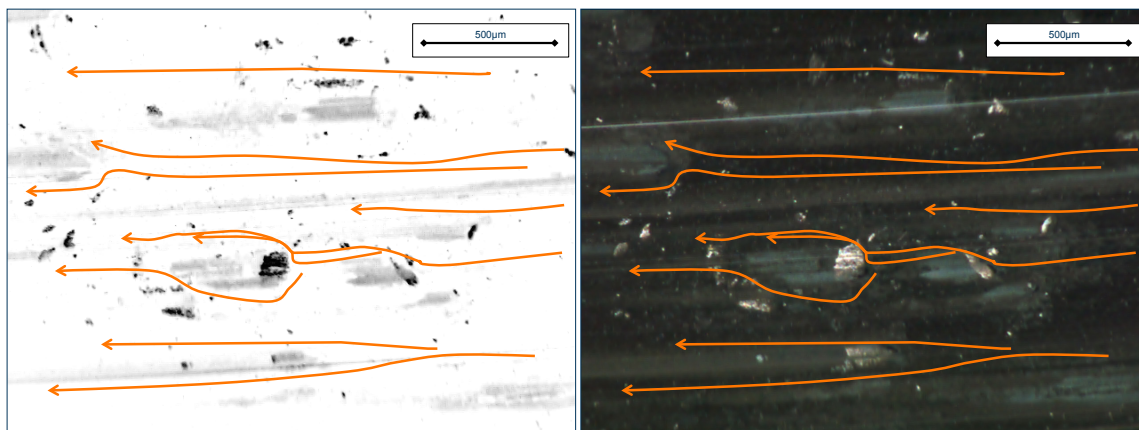


Abb. 7.31: Darstellung von durch Primärplateaus beeinflussten Partikelbahnen beim ECE-kf, invertiertes (links) und Originalbild (rechts), $n = 200$ U/min bzw. $v = 1,65$ m/s

Vergleichend sind das gefilterte und invertierte Videobild (als Basis für die eigentliche Partikeldetektion) sowie das Originalvideobild aufgeführt, um

Partikel und auch die Hindernisse besser zu erkennen. In solchen Ausschnitten zeigt sich ein bezüglich der relativ geradlinigen Partikelbahnen durchaus vergleichbares Bild zum NAO, jedoch wirken hierbei geringere Flächenpressungen.

Ein für den ECE-kf viel typischeres Verhalten, das bei hohen Flächenpressungen vorliegt, ist in Abb. 7.32 (bzw. Abb. 13.16) zu erkennen. Dabei können Eisenspäne und Primärpatches zu deutlichen Ablenkungen führen. Das Bild links verdeutlicht eine Verengung aufgrund von Eisenspänen, so daß sich Partikel ansammeln und abprallen bzw. sich sogar kurzzeitig entgegen der Drehrichtung bewegen können. Die mittlere Partikelgeschwindigkeit ergibt sich zu $v = 0,015 \text{ m/s}$.

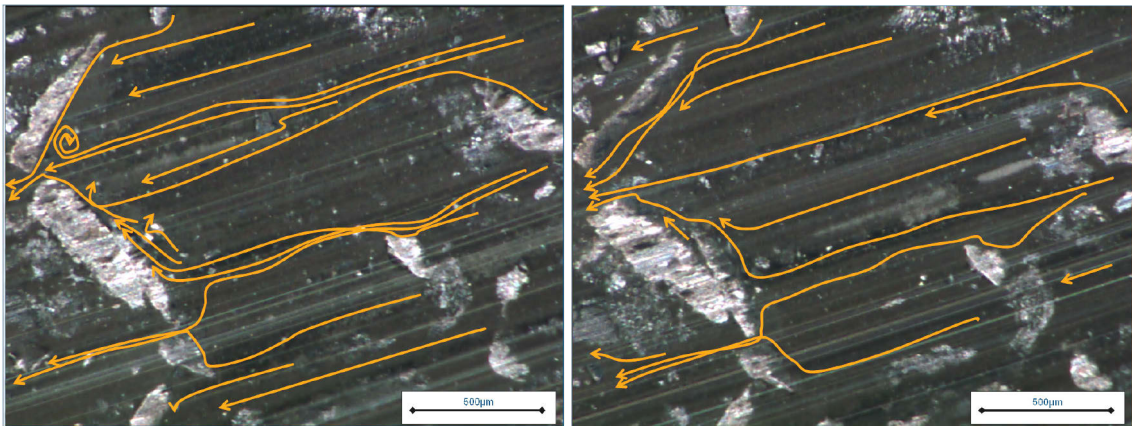


Abb. 7.32: Partikelbahnverengung bei einem ECE-kf (links), Öffnung der Verengung (rechts), $n = 300 \text{ U/min}$ bzw. $v = 2,5 \text{ m/s}$

Im Verlauf der Bremsung öffnet sich die Verengung (Abtragen der Eisenspäne), so daß die Partikel besser abfließen können, eine gerichteter Bewegung einsetzt und die mittlere Geschwindigkeit ($v = 0,033 \text{ m/s}$) steigt (Bild rechts). Dabei folgen die Kleinstpartikeln den Größeren.

Ein weiteres Beispiel, wie die Partikelbahnen und auch die – geschwindigkeiten durch die Belagtopographie deutlich beeinflußt werden, verdeutlicht Abb. 7.33 (bzw. Abb. 13.17).

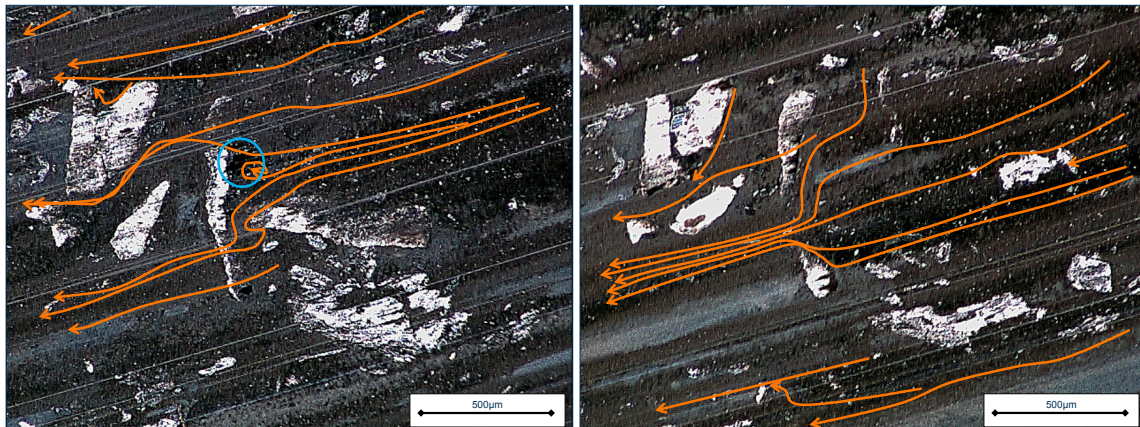


Abb. 7.33: Partikelflußstauung und Sekundärpatchbildung (links, blaue Markierung), Partikelflußbeschleunigung (rechts) beim ECE-kf, $n = 100$ U/min bzw. $v = 0,8$ m/s

Zahlreiche Primärpatches und Inhomogenitäten bewirken eine Umlenkung und Stauung der Partikelflüsse, so daß sich auch Sekundärpatches (Markierung, Bild links) ausprägen können. Im weiteren Verlauf wird der hemmende Primärpatch zum Teil abgetragen, so daß sich eine trichterförmige Partikelbewegung einstellt (Bild rechts). Zuvor ist mit dem Primär- auch der Sekundärpatch abgetragen worden. Durch die nun freie Bewegung bzw. den Trichtereffekt steigt ebenso die mittlere Geschwindigkeit (von $v = 0,021$ m/s auf $0,031$ m/s).

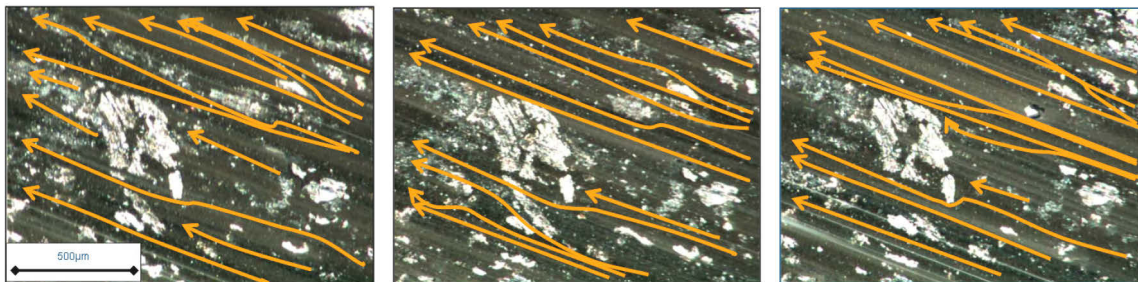


Abb. 7.34: geradlinige Partikelbewegungen beim ECE-mk (auslaufseitig, nach 21, 24 und 31 Minuten Schleppbremsungsdauer), $n = 100$ U/min bzw. $v = 0,8$ m/s

Auch für den **ECE-mk** finden sich Beispiele relativ geradliniger Partikelbahnen (Abb. 7.34). Dies geschieht zumeist in Bereichen, in denen die Flächenpressungen nur gering ausfallen, wie im Auslauf der Reibzone. Auffällig ist eine hohe Dichte an Inhomogenitäten bzw. Primärplateaus.

Diese bremsen die Partikel und verringern dadurch deren mittlere Geschwindigkeit.

Den größeren Einfluß hat jedoch die geringere Flächenpressung auf das Geschwindigkeitsniveau, welches mit $v = 0,007$ m/s für dieses Beispiel anzugeben ist. Die Partikel bewegen sich auf diskreten Bahnen, wobei sie in diesem Beispiel zumeist geradlinig verlaufen und nur geringe Ablenkungen zu verzeichnen sind. Die Ströme sind bestimmt durch die größeren Partikel, die von den Kleinstpartikelströmen begleitet sind, und können daher analytisch ausgewertet werden.

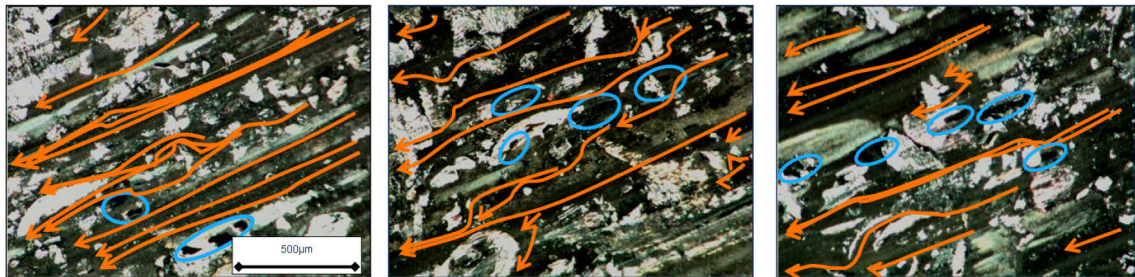


Abb. 7.35: Ausprägung von Sekundärplateaus (blaue Markierung) und deren Einfluß auf Partikelbahnen beim ECE-mk (einlaufseitig, nach 21, 33 und 46 Minuten Schleppbremsungsdauer), $n = 100$ U/min bzw. $v = 0,8$ m/s

Typisch für den ECE-mk bei hohen Flächenpressungsverhältnissen (wie im Einlaufbereich der Reibzone) sind Partikelbewegungen wie in Abb. 7.35 dargestellt. Zunächst zeigen sich sehr viele kleine Primärplateaus und Inhomogenitäten, so daß die Partikelgeschwindigkeiten sinken ($v = 0,006$ m/s) und die Partikel zum Teil sehr deutliche Ablenkungen erfahren. Später ebnen sich die kleineren Primärplateaus ein, so daß breitere und längere Kanäle entstehen, in denen sich die Partikel ungehinderter bewegen können, woraufhin die mittlere Geschwindigkeit ansteigt (auf $v = 0,009$ m/s bzw. $0,012$ m/s bei 33 bzw. 46 Minuten). Dies ist begleitet von einem deutlichen Patchauf- und -abbau (Sekundärpatches), der jedoch durch Kleinstpartikel, die mit optischen Mitteln nicht dezidiert detektiert werden können, erfolgt.

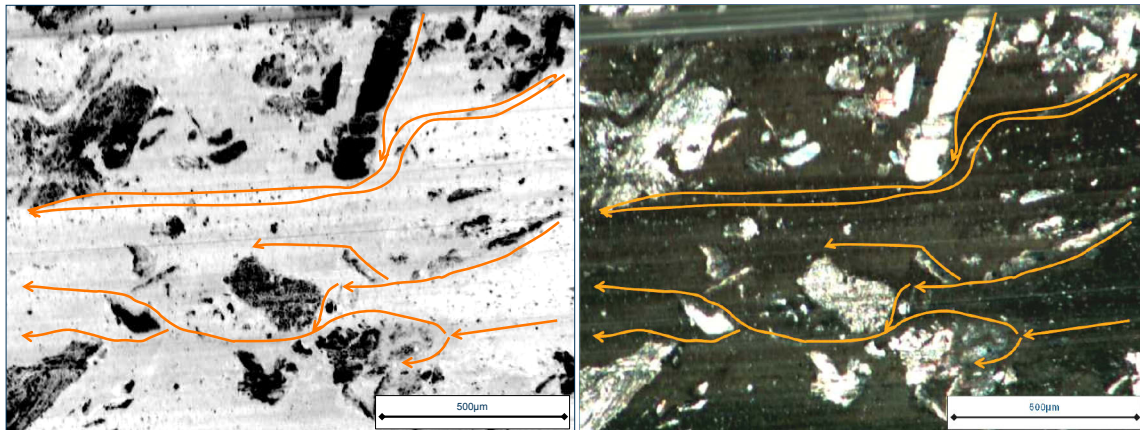


Abb. 7.36: Partikelbahnbeeinflussung durch Primärpatches, ECE-mk, $n = 100$ U/min bzw. $v = 0,8$ m/s

Auch beim ECE-mk läßt sich der Einfluß von Eisenspänen, die als Primärplateaus beschrieben werden können, deutlich erkennen (Abb. 7.36). Diese führen zu deutlichen Beeinflussungen der Partikelbahnen und damit Ablenkungen der Partikel. Es ist demnach möglich, daß sich zur Drehrichtung fast orthogonale Partikelbewegungen einstellen. Auch die übrigen vorhandenen Primärpatches bewirken komplexe Partikelströmungen, die zusammengeführt oder auch separiert werden können, woraufhin die Strömungsgeschwindigkeiten sinken oder ansteigen. Generell ist hinsichtlich der Relation der mittleren Partikelgeschwindigkeiten zu den Relativgeschwindigkeiten festzuhalten, die Partikelgeschwindigkeiten deutlich geringer ausfallen. Sie weisen mitunter große Schwankungen im direkten Bezug zur Relativgeschwindigkeit auf, die sich in der Regel zirka auf den Faktor 100 bis 200 (bezogen auf die Großpartikel) belaufen. Dies verdeutlicht zum einen, daß pauschale Reibmodellparametrisierungen wenig zielführend sind, zum anderen, daß mit Hilfe der vorgestellten Methode realistische Partikelgeschwindigkeiten erfaßt und bestehenden Reibmodellen zugeführt werden können. Als Ursache für die deutlich geringeren Partikelgeschwindigkeiten wird der nicht kontinuierliche Kontakt zwischen Scheibe und Partikel verantwortlich gemacht. Die Partikel haften nicht an der Scheibe an, sondern bewegen sich auf definierten Partikelbahnen auf

der Belagoberfläche und erfahren nur diskrete Bewegungsimpulse von der Bremsscheibe. Die komplexe Oberflächentopographie beeinflusst die Partikelbewegung deutlich, so daß die Partikel immer wieder verzögert und beschleunigt werden, was zu den signifikanten Schwankungen in den Geschwindigkeitsverläufen führt und diese erklärt.

Erste Versuche zur Bestimmung von Geschwindigkeitsvektorfeldern wurden mit der Software VidPIV (Herausgeber: ILA – Intelligent Laser Applications GmbH, Jülich) bereits erfolgreich unternommen. Anhand des vorgestellten Beispiels soll verdeutlicht werden, daß die erfaßten Groß- und Mediapartikel mittlere Geschwindigkeiten zwischen $v = 0,02$ und $0,03$ m/s annehmen, während die Partikelströme (Feinstpartikel) in den charakteristischen Partikelbahnen (s.a. markierter Bereich Abb. 13.18) mit Geschwindigkeiten von zirka $0,0025$ m/s bestimmt werden können, was einem Faktor zwischen Groß/ Medium- und Feinstpartikeln von rund 10 entspricht. Dies verdeutlicht, daß die Feinstpartikelströme zwar langsamer, jedoch auch gleichmäßiger bzw. –förmiger verlaufen. Es wird vermutet, daß sich die Feinstpartikel weniger exponiert bewegen, da sie sich in den Partikelkanälen nur partiell in Kontakt mit der sich drehenden Bremsscheibe befinden. Die Groß- und Mediapartikel indes werden zwar öfter durch Hindernisse der Belagtopographie abgebremst oder gar in den Stillstand gezwungen, aufgrund ihrer Größe und auch zuweilen erhabeneren Position (sie bewegen sich nicht in jedem Fall in den abgesenkten Partikelkanälen) scheinen sie jedoch öfter in direkten Kontakt mit der Scheibe zu treten, so daß sie entsprechende Geschwindigkeitsimpulse erfahren und ihre mittleren Geschwindigkeiten höher ausfallen.

Diese ergänzenden Analysen bestätigen zudem die zuvor geäußerte Feststellung, daß sich die Partikel, gleich ihrer Dimensionen, aufgrund ihrer relativ ähnlichen mittlere Geschwindigkeitsniveaus bei der Patchausprägung ergänzen und sich daher ein ausgeglichenes, stabiles

Patchwachstum einstellen kann, sofern stabile und hohe Flächenpressungsverhältnisse vorliegen.

7.2.2 Analyse der Partikelgrößenverteilungen

Die Verteilung der ermittelten Partikelgrößen für die jeweiligen Schleppbremsungen sind in Abb. 7.37 dargestellt. Gegenübergestellt finden sich der NAO-Belag sowie der ECE-kf als Beispiel für ECE-Kompositionen.

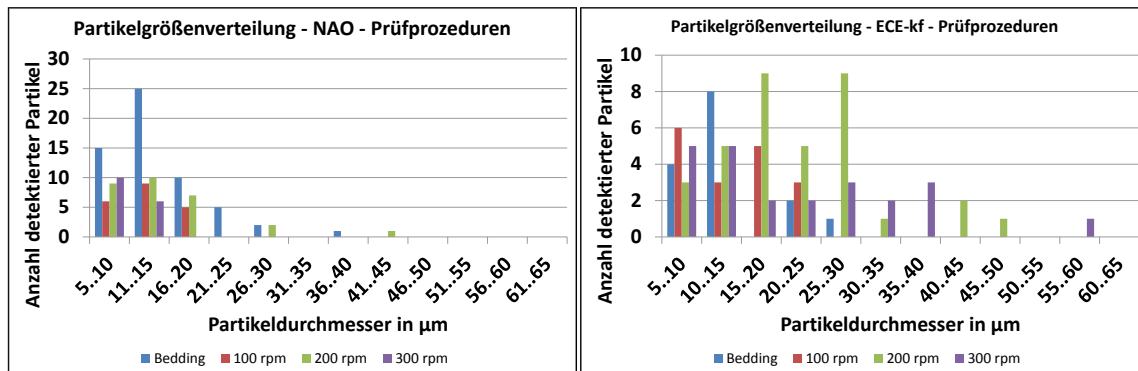


Abb. 7.37: Partikelgrößenverteilungen für NAO (links) sowie ECE-kf (rechts)

Die Klassifizierung der Partikelgrößen erfolgt zunächst im Bereich der äquivalenten Partikeldurchmesser zwischen 5 und 65 µm. Generell wird jedoch in drei Partikelklassen unterschieden. Die Feinst- und Kleinpartikel sehen Durchmesser bis 5 µm vor, können jedoch durch die optische Auswertemethode nicht berücksichtigt werden. Als zweite Klasse werden Partikel berücksichtigt, die sich zwischen 5 und 30 µm bewegen und als Mediumpartikel bezeichnet werden, während Großpartikel (größer 31 µm) die dritte Partikelklasse darstellen.

Beim NAO werden für alle Prozedere die meisten Partikel mit Durchmessern zwischen 5 und 20 µm detektiert. Für das Bedding fällt auf, daß sehr viele Partikel erfaßt und ausgewertet werden können. Der Einlaufvorgang bewirkt eine hohe Anzahl an Partikeln. Im eingelaufenen Zustand setzen sich die zum Teil breiartigen Partikelströme dann mit vielen kleineren und Kleinstpartikeln, die optisch nicht einzeln verfolgt werden können, durch. Abhängigkeiten hinsichtlich der Drehzahl und der Partikelgrößenverteilungen lassen sich nicht erkennen. Eine gemeinsame

Betrachtung aller detektierten Partikel der verschiedenen Schleppbremsungen hinsichtlich ihrer Größenverteilungen wird als zulässig erachtet, da eine stochastische Verteilung der Partikeldurchmesser in Bezug auf die Relativgeschwindigkeit vorliegt.

Der ECE-kf zeigt einen breiteren Bereich der detektierten Durchmesser, der nun zwischen 5 und 30 μm liegt. Für das Bedding kann eine erhöhte Anzahl von Partikeln, wie beim NAO zuvor, hier nicht festgestellt werden, so daß die Beddingprozedur keine besonderen Auffälligkeiten besitzt. Zwar können bei den ECE-Belägen mehr größere Partikel erfaßt werden, die zudem aus Versuchen mit höherer Drehzahl (200 und 300 U/min) stammen, eine generelle reibgeschwindigkeitsabhängige Größenverteilung ist jedoch nicht zu konstatieren. Daher werden auch für die beiden ECE-Beläge die Partikel der verschiedenen Schleppbremsungen gemeinsam betrachtet.

Die entsprechenden Partikelverteilungen aller Messungen sind daher für alle drei Beläge als Histogramm in Abb. 7.38 dargestellt, während sich die zugehörigen Dichtekurven im Anhang befinden (Abb. 13.19).

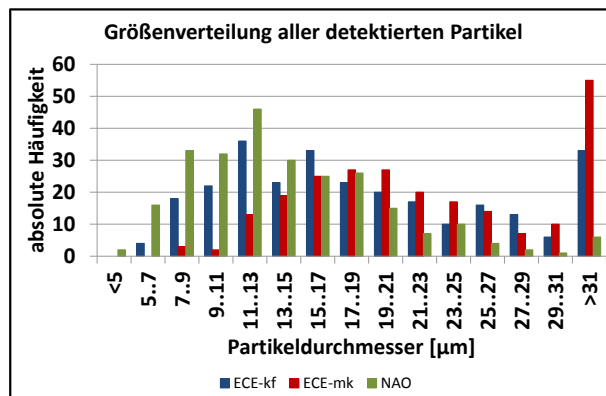


Abb. 7.38: Partikelgrößenverteilungen (Histogramm) für NAO, ECE-kf sowie ECE-mk

Die Ergebnisse korrelieren mit den Beobachtungen aus Kapitel 7.2.1. Der NAO besitzt häufig sehr viele Kleinstpartikel, die zudem einen breiartigen Partikelstrom bilden können. Er neigt daher tendenziell zu kleineren Partikeldurchmessern. Die ECE-Beläge zeigen zwar auch Kleinstpartikel, jedoch sind größere Partikel häufiger zu erkennen, was für den ECE-mk

noch mehr gilt. Auch dies bestätigt sich bereits mit der Partikelbahncharakterisierung: die zahlreichen Primärplateaus und Inhomogenitäten werden verschlissen und geben dabei im Vergleich zum NAO größere Partikel frei, die erfaßt werden können. Gut verdeutlicht dies auch der Anstieg der Großpartikel (Durchmesser größer $31\ \mu\text{m}$). Sie sind beim NAO kaum zu detektieren, bei beiden ECE-Belägen indes treten sie deutlich häufiger auf.

Die Charakterisierung der Dichtekurven sowohl unter Zuhilfenahme des Chi-Quadrat, als auch des Shapiro-Wilk Kriteriums verdeutlicht, das es sich um keine Standardnormalverteilung handelt, sondern um Verschiebungen von dieser. Die Bestimmung des Exzesses und die Anwendung der Lageregeln erlaubt zudem die Aussage, daß für alle drei Belagkonzepte eine flache und linkssteile (bzw. rechtsschiefe) Verteilung festzustellen ist.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß die Verteilung der Feinstpartikel zwar nicht quantitativ ermittelt werden konnte, die Betrachtung der in-situ Aufnahmen jedoch beim NAO einen höheren Feinstpartikelanteil als bei beiden ECE-Belägen erkennen lassen. Die Mediapartikel bestätigen diesen Verteilungstrend, wonach der NAO eher kleinere Abriebpartikel aufweist als die ECE. Ähnliches läßt sich auch anhand der Großpartikel bestätigen, da diese bei den ECE-Belägen deutlich zahlreicher vorkommen als beim NAO.

7.2.3 Analyse des Bewegungsverhaltens

Im Rahmen der Bewegungsanalysen werden die (mittleren) Partikelgeschwindigkeiten und Bewegungszeiten für die Belagkonzepte vergleichend gegenübergestellt. Sie haben sich nach verschiedenen Voruntersuchungen in Bezug auf die in Kapitel 3.6.5 genannten Größen als zielführend erwiesen. Auch werden die Einflüsse von Betriebsparametern (Drehzahl) sowie den Partikelgrößen vorgestellt. Gegenübergestellt werden jeweils der NAO sowie der ECE-kf als Beispiel für das ECE-Belagkonzept.

Die **Charakterisierung der Partikelgeschwindigkeiten** erfolgt zunächst (exemplarisch) für die Geschwindigkeits-Zeit-Verläufe der detektierten

Partikel. Betrachtet wird eine vergleichbare Videosequenz (Meßposition, Betriebsparameter), innerhalb derer mehrere Partikel ausgewertet werden (Abb. 7.39). Es zeigt sich, daß die Partikel nur für sehr kurze Zeiten detektiert und verfolgt werden, bevor sie den betrachteten Reibzonenausschnitt wieder verlassen. Dabei sind die ermittelten Geschwindigkeiten beim NAO höher als beim ECE. Dies betrifft die maximalen Geschwindigkeiten ebenso wie das mittlere Geschwindigkeitsniveau über die betrachtete Zeitdauer.

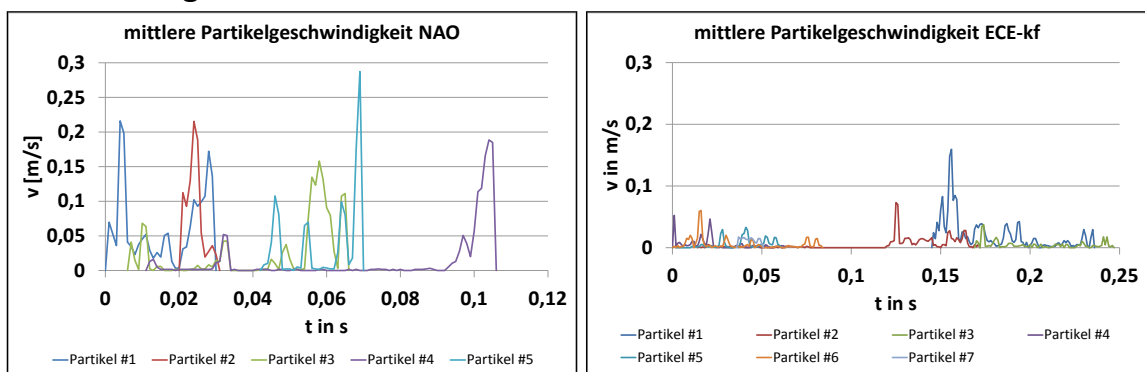


Abb. 7.39: Darstellung von v-t-Diagrammen für detektierte Partikel beim NAO (links) und ECE-kf (rechts)

Die Charakterisierung der Partikelgeschwindigkeiten in Bezug auf die detektierten Partikelgrößen für die einzelnen Schleppbremsungen ist exemplarisch für die Drehzahl von 100 U/min in Abb. 7.40 dargestellt. Für den NAO-Reibbelag zeigt sich keine eindeutige Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeiten mit und ohne Verweildauer. Die Unterschiede zwischen beiden Geschwindigkeiten sind meist auf vergleichbarem Niveau, in wenigen Fällen können sie jedoch auch sehr deutlich ausfallen. Der jeweilige Partikel erfährt dann extrem hohe Verweildauern. Obwohl für einzelne Partikel sowohl sehr hohe, als auch sehr geringe mittlere Geschwindigkeiten ermittelt werden können, werden für weitere Betrachtungen die globalen mittleren Geschwindigkeiten für jeweils eine Schleppbremsung (bzw. Drehzahlvorgabe) bestimmt, da die Verteilungen stochastischen Charakter besitzen. Entsprechende

Korrelationsberechnungen nach Bravais-Pearson zeigten keine linearen Zusammenhänge.

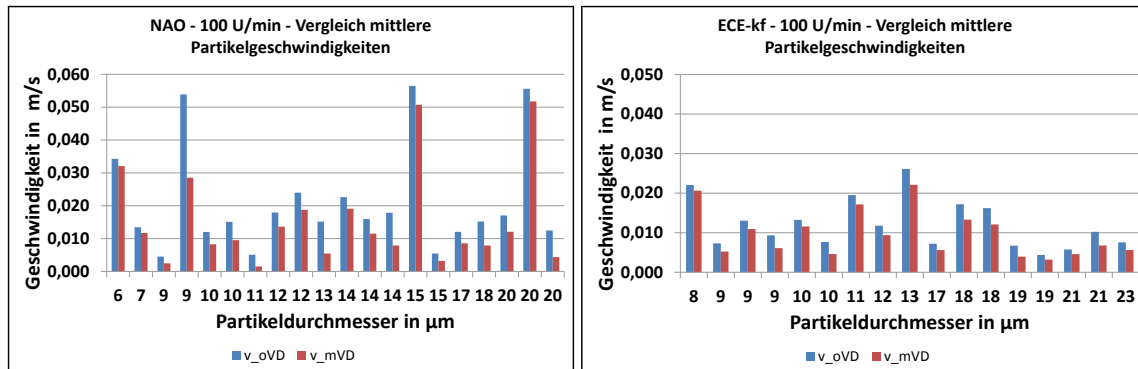


Abb. 7.40: Vergleich der mittleren Partikelgeschwindigkeiten für NAO (links) und ECE-kf (rechts)

Beispielhaft für beide ECE zeigt der ECE-kf ebenfalls ein für die verschiedenen Partikelgrößen konstantes Verhältnis der mittleren Geschwindigkeit mit und ohne Verweildauer. Die beim NAO erkannten Ausreißer treten hierbei kaum auf. Da die Verteilung der erzielten Geschwindigkeiten in Bezug auf die Partikelgrößen keinen deutlichen Trend zeigt, die Korrelationsanalysen nach Bravais-Pearson ergaben ebenfalls keine linearen Zusammenhänge, ist die Betrachtung der gemittelten Partikelgeschwindigkeiten über alle detektierten Partikel einer Prüfung (bzw. Drehzahlvorgabe) zulässig.

Im Vergleich zwischen dem NAO und den ECE-Belägen fällt auf, daß die Streuung der mittleren Geschwindigkeiten beim NAO höher ausfällt bzw. vermehrt Ausreißer festgestellt werden können. Erklärt wird dies mit der Belagtopographie und den sich daraus ergebenden Partikelbahnen. Die zumeist geradlinigen Bewegungsbahnen der NAO-Partikel erlauben höhere mittlere Geschwindigkeiten, was sich im direkten Vergleich in Abb. 7.40 bestätigt.

Im weiteren werden die ermittelten mittleren Geschwindigkeiten für den NAO in Bezug auf die verschiedenen Schleppbremsungen gegenübergestellt (Abb. 7.41, links).

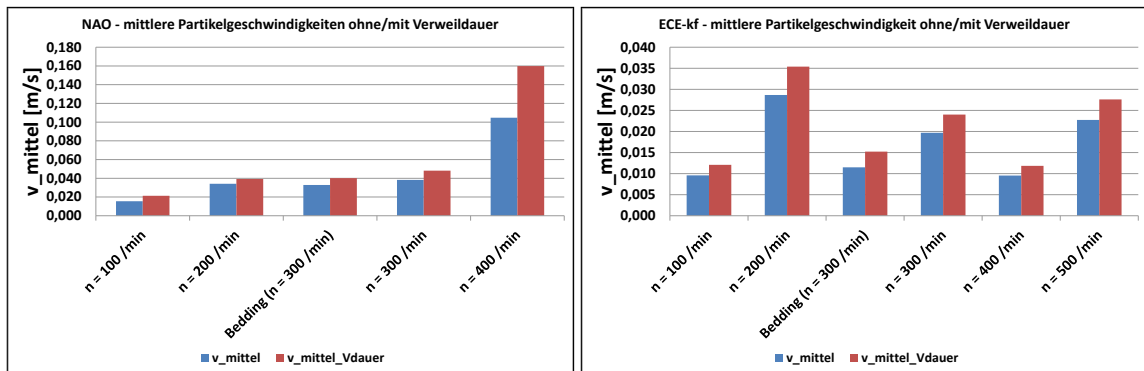


Abb. 7.41: Darstellung der mittleren Geschwindigkeiten mit und ohne Verweildauer für NAO (links) und ECE-kf (rechts)

Es fällt auf, daß ein Einfluß des Beddings besteht. Die mittleren Geschwindigkeiten mit und ohne Verweildauern fallen im Bedding noch geringer aus als bei der späteren Schleppbremsung mit 300 U/min. Dies wird dadurch erklärt, daß die Belagoberflächen homogener und verschliffener sind bzw. eingeebnet werden. Als Trend kann man erkennen, daß die mittleren Geschwindigkeiten mit zunehmender Drehzahl ansteigen. Es stellt sich ein Korrelationskoeffizient r_{xy} von rund 0,8 ein, was einem deutlichen linearen Zusammenhang entspricht.

Auch bei den ECE-Belägen (Abb. 7.41, rechts) zeigt sich der Einfluß des Beddings. Bedingt durch das Abtragen und Einebnen von Inhomogenitäten steigen die mittleren Geschwindigkeiten der Schleppbremsung mit 300 U/min im direkten Vergleich zum Bedding, da sich Partikelbahnen ausgeprägt haben, auf denen die Partikel sich ungehinderter bewegen können.

Die mittleren Geschwindigkeiten zeigen keine einheitliche Abhängigkeit von der Drehzahl, wie dies im Gegensatz dazu beim NAO der Fall ist. Dies wird mit dem Einfluß der inhomogeneren Oberflächengestalt der ECE-Beläge begründet, die damit verdeutlicht, daß sie einen größeren Einfluß auf die mittleren Partikelgeschwindigkeiten als die Scheibendrehzahl besitzt. Bestätigt wird das eher stochastische Verhalten durch die Bestimmung der Korrelation, die mit einem Wert für r_{xy} von rund 0,1 den nichtlinearen Zusammenhang unterstreicht.

Die **Charakterisierung des Partikelzeitverhaltens** berücksichtigt die jeweiligen Zeiten in Bewegung und die Standzeiten. In Abb. 13.20 sind die Ergebnisse für eine exemplarische Auswahl von Schleppbremsungen bei 100 U/min dargestellt.

Die detektierten Zeiten (Stand- sowie Bewegungszeit) lassen für den NAO keinen deutlichen und einheitlichen Zusammenhang mit der Partikelgröße erkennen. Sowohl große als auch kleine Partikel können sich demnach unter bestimmten (topographischen) Randbedingungen schnell oder langsam durch den beobachteten Reibzonenausschnitt bewegen. Eine eindeutige Abhängigkeit der Stand- bzw. Bewegungszeiten zur Partikelgröße kann in keinem Fall aufgezeigt werden, was Korrelationsrechnungen bestätigen. Daher werden für die weiteren Betrachtungen die Stand- und Bewegungszeiten pro Prüfprozedur (bzw. Schleppbremsung) über alle Partikel gemittelt.

Ebenso wie für den NAO lassen sich für die ECE-Beläge keine linearen Abhängigkeiten der Stand- und Bewegungszeiten von der Partikelgröße nach Bravais-Pearson erkennen. Die schwankenden Bewegungszeiten weisen keine deutlichen Ausreißer auf, weshalb eine Mittelung über alle detektierten Partikel für weitere Betrachtungen vorgenommen wird.

Der direkte Vergleich von NAO und ECE zeigt für beide Beläge vergleichbare Bewegungszeiten. In Bezug auf die Standzeiten weist der NAO jedoch deutliche höhere Werte auf, so daß daraus geschlußfolgert werden kann, daß seine Partikel längere Zeit in der Reibzone verweilen können, jedoch höhere Geschwindigkeiten erreichen.

Betrachtet man die Anteile der gemittelten Zeiten für die einzelnen Schleppbremsungen des NAO in Abb. 7.42, fällt auf, daß die Standzeiten mit zunehmender Drehzahl fallen, während die Bewegungszeiten steigen. Somit verharren die Partikel mit steigender Drehzahl weniger lange in der Reibzone. Um diesen Trend weiter zu verdeutlichen, wurden ergänzend Schleppbremsungen bei 400 U/min in der Auswertung berücksichtigt. Die durchgeführten Korrelationsrechnungen bestätigen dieses Verhalten ($r_{xy} \approx$

0,9 für den Anteil der Bewegungszeit, was einem direkten linearen Zusammenhang entspricht). Auch der Einfluß des Beddings zeigt sich klar. Die Etablierung von Bewegungskanälen sowie der Einebnung von Inhomogenitäten durch das Bedding führt dazu, daß bei der folgenden Schleppbremsung die Verweildauern der Partikel sinken.

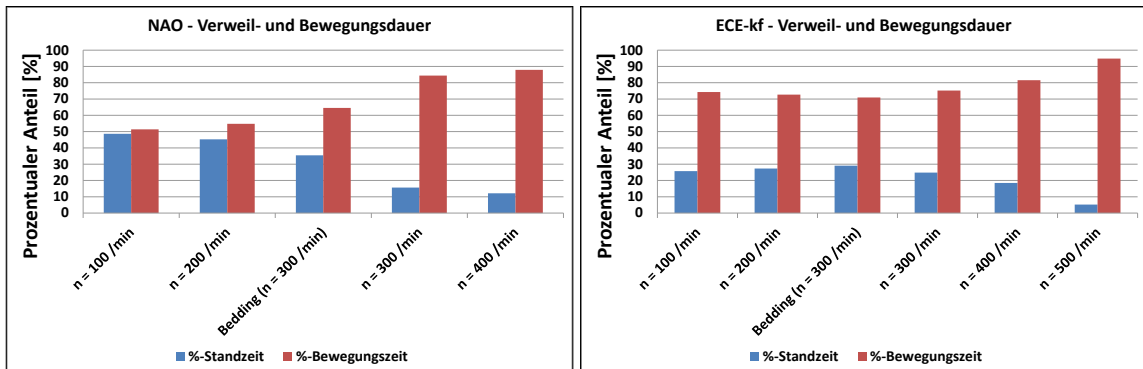


Abb. 7.42: Verweil- und Bewegungsdauern für verschiedene Prüfprozedere für NAO (links) und ECE-kf (rechts)

Auch für den ECE-kf wird deutlich, daß mit steigender Drehzahl die Anteile der Standzeiten sinken und die Zeit in Bewegung zunimmt (Abb. 7.42, rechts). Da sich der Korrelationskoeffizient r_{xy} mit rund 0,8 angeben läßt, bestätigt sich dieser Trend auch analytisch. Ebenso ist der Bedding-Einfluß erkennbar. Die Ausprägung von Bewegungskanälen sowie die Gestaltanpassung von Primärpatches und Inhomogenitäten führen dazu, daß die Partikel weniger Zeit verweilen bzw. länger in Bewegung bleiben.

Als Fazit zeigen sich eindeutige Trends bei den Bewegungs- und Standzeiten. Die steigende Drehzahl verringert die Standzeiten und erhöht den Anteil in Bewegung. Die Partikel erhalten demnach höhere Bewegungsimpulse, so daß sie weniger lange an Hindernissen verharren müssen. In Bezug auf die mittleren Partikelgeschwindigkeiten (mit und ohne Verweildauer) hingegen ist ein solcher Trend für die untersuchten Belagkonzepte nicht eindeutig festzustellen. Generell gilt, daß die mittleren Partikelgeschwindigkeiten signifikant geringer im Vergleich zu den Scheibendrehzahlen ausfallen. Die Partikel des NAO-Belags weisen höhere mittlere und maximale Geschwindigkeiten auf als die ECE-Beläge, was mit

der Oberflächengestalt sowie der Ausprägung der Bewegungskanäle erklärt werden kann. In Bezug auf die Bewegungszeiten in festzustellen, daß diese für beide Belagkonzepte annähernd gleich ausfallen, während die Standzeiten beim NAO höher sind. Dies ist insofern interessant, als daß die Oberflächenstruktur kurze Verweildauern in der Reibzone erwarten läßt. Dennoch bedeuten Hindernisse auf den Partikelkanälen ein Verharren der Partikel, auch wenn sie sich dazwischen sehr schnell bewegen können. Zwar weisen die ECE-Beläge eine zerklüftete Oberfläche auf, die die Partikel abbremst und ablenkt, was die mittleren und maximalen Geschwindigkeiten verringert. Jedoch gelingt es den Partikeln länger in Bewegung zu bleiben bzw. kürzere Verweildauern einzunehmen.

7.3 Möglichkeiten lokaler Patch- und Partikelanalysen unter Verwendung segmentierter Graugußscheiben (SGG)

Neben den Versuchen mit einer Vollglasscheibe VGS soll auch das entwickelte hybride Scheibenkonzept SGG (segmentierte Graugußscheibe) auf seine Tauglichkeit für Patch- und Partikelanalysen untersucht werden. Damit soll eine Brücke zwischen der VGS und einer konventionellen Graugußscheibe (GGS) geschlagen werden, indem zum einen eine Visualisierung mindestens eines Reibzonenausschnittes möglich ist, und zum anderen eine Reibpaarung Grauguß – organischer Reibbelag Berücksichtigung findet. Daneben wird ebenso erwartet, daß das hybride Scheibenkonzept SGG aufgrund seiner günstigen strukturmechanischen Eigenschaften anspruchsvollere und kritischere Betriebsbedingungen zuläßt. Dies betrifft im besonderen höhere Betriebstemperaturen, aber auch höhere applizierte Bremsdrücke. Schließlich kann die SGG auch dazu beitragen, die Wirkmechanismen spezieller Problemstellungen wie dem Metal Pick Up (MPU) besser zu beschreiben, zu erklären und vorherzusagen.

7.3.1 Lokale Patchanalysen bei Nutzung einer SGG

Aus umfangreichen Voruntersuchungen erwies sich ein geändertes Objektiv (Keyence Z50) für die Untersuchungen an der SGG als zielführend.

Die folgenden Ergebnisse, auch die der in Kapitel 7.3.2 vorgestellten, wurden daher mit diesem Objektiv erzielt. Neben der SGG findet ein NAO-Belag Verwendung, da er sich als vorteilhafter in der Partikel- und Patchgenerierung im Vergleich zu den ECE-Belägen erwiesen ist.

Zunächst soll eine SGG mit versetzten Glassegmenten (SGG_v), die nicht direkt im Reibkontakt mit dem Belag stehen, betrachtet werden. Hintergrund ist die Vorstellung, zwar die Reibzone in-situ zu charakterisieren, jedoch keinen Kontakt mit dem Glas zuzulassen, um ausschließlich die Paarung Grauguß – Reibbelag zu berücksichtigen. Im Schleppmodus lassen sich bei 300-facher Vergrößerung Unterschiede der Reibschicht (Markierung) erkennen (Abb. 7.43).

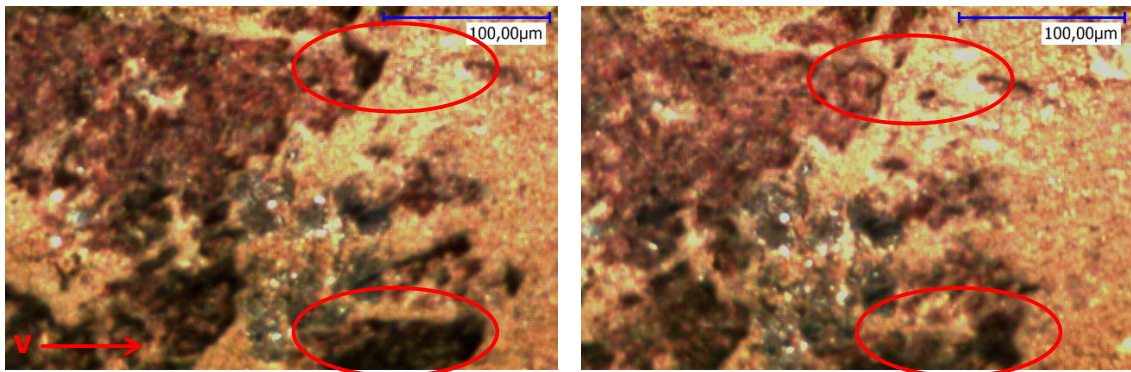


Abb. 7.43: lokale Patchdynamik während einer Schleppbremsung, 300-fache Vergrößerung, bei 16,8 s (links) und 30,5 s (rechts), SGG_v

Gut zu erkennen sind sich mit Abriebpartikeln auffüllende, aber auch wegbrechende Bereiche, als deren Folge lose Abriebpartikel entstehen. Es ist festzuhalten, daß bei Nutzung einer SGG_v 300-fache Vergrößerungen zielführender als 100-fache sind.

Auch innerhalb von Stopbremsungen sind Oberflächenveränderungen erkennbar (Abb. 13.21). Diese Änderungen fallen jedoch nur moderat aus und betreffen zumeist die auffälligen Kohlenstoffbereiche (dunkler Kontrast). Eine deutliche Sekundärpatchbildung ist nicht auszumachen.

Weitere Untersuchungen berücksichtigen eine segmentierte Graugußscheibe mit ebenen Glassegmenten (SGG_e), welche im direkten

Reibkontakt mit dem Bremsbelag stehen. Hierdurch wird der Reibkontakt nicht unterbrochen und die Gefahr besteht nicht, daß der Partikelstrom abreißt.

Messungen mit 100-facher Vergrößerung (Abb. 7.44) zeigen, daß bei Nutzung der SGG_e ein besserer Überblick bei ausreichender Detailtiefe geliefert und diese Vergrößerung fortan genutzt wird.



Abb. 7.44: lokale Patchdynamik während einer Schlepptbremsung, 100-fache Vergrößerung, bei 1,75 s (links), 57,5 s (Mitte) und 118,7 s (rechts) der Bremsung, SGG_e

Es werden deutliche Änderungen des Reibzonenausschnittes erkannt. Die Kohlenstoffbereiche füllen und leeren sich im Wechsel über eine Schlepptbremsung mit Abriebpartikeln, so daß sich die Reibzontopographie ständig ändert. Grund für die nur moderaten Änderungen ist die Tatsache, daß die Flächenpressungsverhältnisse für den betrachteten Ausschnitt ebenfalls nur moderat ausfallen und sich daher kaum Sekundärpatches ausbilden, wohl aber Ströme von Feinstpartikeln. Die Unterschiede zwischen tragenden und nicht-tragenden Bereichen in Bezug auf die Reibschicht sind zudem ergänzend im Anhang (Abb. 13.22) verdeutlicht.

Die Feinstpartikelströme, die sich jedoch kaum zu Patches kompaktieren und verfestigen lassen, treten auch bei Stopptbremsungen auf und können die Kohlenstoff- und deren Nachbarbereiche stark überspülen, sofern die Flächenpressungen geringer ausfallen (Abb. 13.23). Trotz der sich ändernden Flächen- bzw. -pressungsverhältnisse sind die Änderungen der Reibschicht als moderat zu berechnen.

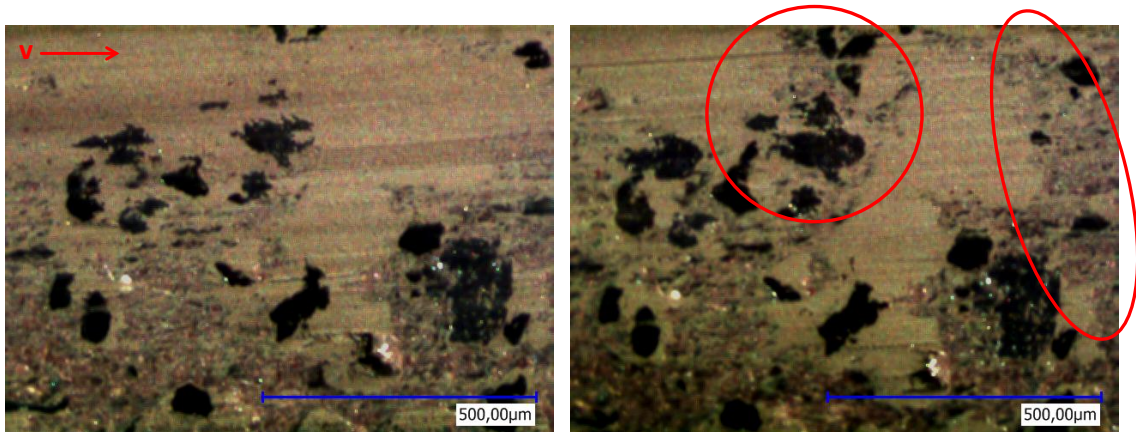


Abb. 7.45: Reibringverlagerung und ihre Auswirkungen während einer Stopbremsung, 100-fache Vergrößerung, SGG_e

Im Rahmen der Untersuchungen konnten ebenfalls Reibringverlagerungen während einer Bremsung erkannt werden (Abb. 7.45). Im gezeigten Beispiel hat sich der Reibring nach oben verlagert und die zuvor überspülten Bereiche werden nun großflächig freigelegt. Dies betrifft nicht nur die Kohlenstoff, sondern auch deren Nachbarbereiche (markierte Bereiche). Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß die lokale Patchdynamik unter Nutzung einer segmentierten Graugußscheibe (SGG_e) beschrieben werden kann. Phänomene wie Reibringverlagerungen und die Änderungen der Reibschichtgestalt sind gut zu erkennen und können charakterisiert werden.

7.3.2 Lokale Partikelanalysen bei Nutzung einer SGG

Die Nutzung eines hybriden Scheibenkonzepts wurde in Kapitel 7.3.1 bereits für lokale Patchanalysen vorgestellt, so daß nun auch die Möglichkeiten bezüglich der Partikeldynamik untersucht werden sollen. Zunächst werden die Ergebnisse der segmentierten Graugußscheibe mit versetzten Scheibenelementen (SGG_v) vorgestellt. Für Schleppbremsungen, wie in Abb. 7.46 dargestellt, zeigen sich auch bei längerer Bremsdauer von maximal 60 s keine deutlichen Patchveränderungen. Die Partikelströme sind nur schwach erkennbar und zeigen sich in einer Art Wolkenform (Markierung). Trotz einer gegenüber den Standardversuchen höheren

Vergrößerung ist jedoch eine Detaillierung bzw. verbesserte Auflösung dieser Partikelströme nicht möglich. Die Partikel sind in ihren Durchmessern zu klein und lassen sich nicht separieren. Zudem ist ein Abreißen der Partikelströme durch den Übergang Grauguß – Glas nicht auszuschließen.



Abb. 7.46: lokale Partikeldynamik während einer Schleppbremsung, 300-fache Vergrößerung, bei 24,3 s (links) und 41,3 s (rechts) der Bremsung, SGG_v

Ergänzend durchgeführte Stoppbremsungen bestätigen die getroffenen Aussagen für die Schleppbremsungen (Abb. 13.24). Partikelbewegungen bzw. –strömungen sind insbesondere anhand der Videoaufnahmen deutlich erkennbar, jedoch mit den bisherigen Ansätzen nicht objektiv beschreibbar. Beschreibbar ist in jedem Fall, daß das Volumen der Partikelströme zum Ende der Bremsung (mit Abnahme der Drehzahl bzw. Relativgeschwindigkeit) erwartungsgemäß abnimmt.

Die Nutzung einer segmentierten Graugußscheibe mit ebenen Glassegmenten (SGG_e) läßt aus Abb. 7.47 Partikelströme aus nanoskaligen Partikeln erkennen, wie sie auch bei den VGS bereits beschrieben wurden. Diese gehen einher mit nur schwach ausgeprägten Patchveränderungen. Zu einem Abreißen der Partikelströme kommt es nicht.

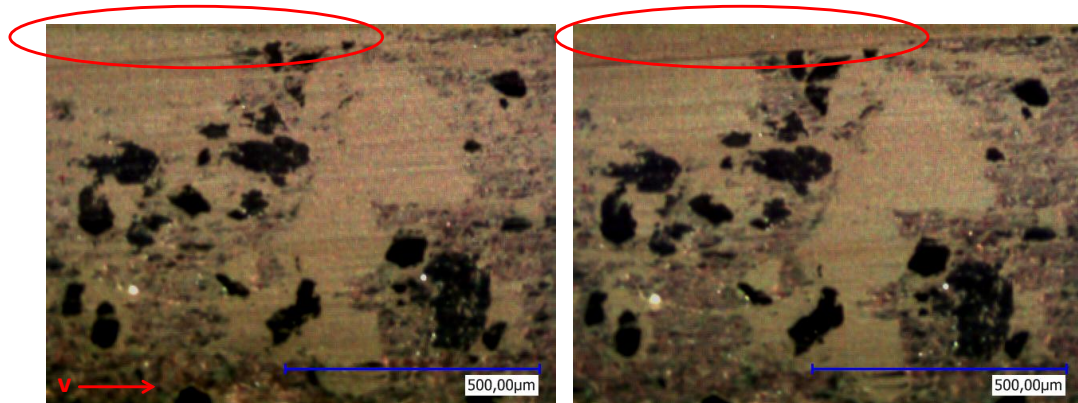


Abb. 7.47: lokale Partikeldynamik während einer Stoppbremsung, 100-fache Vergrößerung, in der Mitte (links) und kurz vor dem Ende (rechts) der Bremsung, SGG_e

Generell zeigt sich die Oberflächenstruktur vergleichbar zu der der VGS-Versuche und bestätigt damit die Vergleich- und Übertragbarkeit der Erkenntnisse auch auf Grauguß-Systeme. Im Detail kann festgehalten werden, daß der tragende Bereich sich während der betrachteten Stoppbremsung nach unten verlagert zu haben scheint, was der dichte Partikelstrom im oberen Bildausschnitt (s.a. Markierung) verdeutlicht. Diese dichten Ströme lassen jedoch eine Partikelseparierung mit den bestehenden Ansätzen nicht zu. Hierfür sollten zukünftig Methoden der Vektorfeldbestimmung Anwendung finden.

Als Fazit der Versuche mit der SGG in Bezug auf Partikelanalysen kann demnach festgehalten werden, daß der Nachweis vergleichbarer Oberflächenstrukturen zwischen den VGS-Versuchen und speziell unter Nutzung der SGG_e erbracht wurde, die Reib- und Verschleißmechanismen sind demnach ähnlich. Dies erlaubt den Erkenntnistransfer auf konventionelle Grauguß-Reibpaarungen. Selbst mit Abtastraten von bis zu 500 fps sind jedoch Separierungen bzw. Diskretisierungen größerer Partikel (Durchmesser größer 5 µm) nicht gelungen. Partikelströme mit nanoskaligen Partikeln indes lassen sich erfassen, bedürfen jedoch spezieller Auswertansätze, die sich z.B. an der Bestimmung von vektoriellen Geschwindigkeitsfeldern der Strömungsanalyse orientieren und bereits in Kapitel 7.2.1 erfolgreich getestet wurden.

Die Funktionstauglichkeit eines hybriden Scheibenkonzepts SGG für lokale Patch- und Partikelanalysen wurde erfolgreich nachgewiesen und qualifiziert die Methode als zukunftsfähig. Im Rahmen zukünftiger Arbeiten sollen daher mit dieser Methode kritischere und anspruchsvollere Betriebsparameter wie Temperatur und Bremsdruck berücksichtigt werden und Phänomene wie Metal Pick Up beschrieben und erklärt werden können.

7.4 Lokales Patch- und Partikelverhalten unter globalem Bezug

Das lokale Patchverhalten unter globalem Bezug sieht die sequentielle Betrachtung von verschiedenen Meßbereichen bzw. Meßpunkten in der Reibzone vor, um eine Untergliederung bzw. Klassifizierung der Reibzone in tangentialer und radialer Richtung vorzunehmen. Sie stellt eine Erweiterung der lokalen, mikroskopischen Patchanalysen, die lediglich einzelne, selektierte Bereiche betrachten, dar. Die Orientierung erfolgt an den Meßbereichen der verschiedenen physikalisch / chemischen Untersuchungen, so daß sich 9 Meßpunkte bzw. Meßstellen ergeben (Abb. 13.9, rechts). Diese können dezidiert mit Hilfe einer speziellen Verstelleinheit angefahren werden, so daß die nahezu exakt selben Bereiche erneut betrachtet werden können (Abb. 13.25). Die genutzten Vergrößerungen sind bewußt niedriger gewählt, um einen globaleren Eindruck der Patchdynamik zu erhalten, fallen jedoch mit 100-fach noch immer ausreichend hoch genug aus, um von lokalen Betrachtungen sprechen zu können. Die Abtastraten orientieren sich an denen aus Kapitel 7.1, während für diese Untersuchungen lediglich die VGS in Verbindung mit NAO-Belägen genutzt wurde, da dieser Belag eine überaus ausgeprägte und robuste Patchbildungsfreundlichkeit aufweist. Betrachtet werden sowohl Schlepp-, als auch Stopbremsungen, um eventuell unterschiedliche Reibmechanismen aufzuzeigen.

Die Umsetzung der Analysen erfolgt in Form automatisierter Flächen- und Ausdehnungsbestimmungen mittels selbstentwickelter Skripte unter der Software NI Vision sowie einer manuellen Markierung durch eine

Polygonzugmethode mit Hilfe der Software „VW 9000 Motion Analyzer“ (Fa. Keyence). Bei der erst genannten Methode werden die Videos in Sequenzen von Einzelbildern zerlegt. Anschließend erfolgt eine Segmentierung der Bildbereiche, auf die die Festlegung von Schwellwerten zur Binarisierung des genutzten Graustufenbildes folgt. Anschließend kann eine Ermittlung der relevanten Bildpunkte erfolgen und mittels Größenmaßstab (eine Bildkalibrierung hat zu Beginn der Analysen zu erfolgen) eine Umrechnung in Ausdehnung und Fläche durchgeführt werden. Im Ergebnis soll es möglich sein, für den jeweiligen Bildausschnitt alle am Kontakt beteiligten Bereiche (u.a. Primär- und Sekundärpatches) zu ermitteln, was auch das Partikelverhalten einschließt. Durch diesen Ansatz werden nun auch Partikeldurchmesser kleiner als 5 μm erfaßt, was bedeutet, daß nicht länger einzelne Partikel in ihrem Verhalten untersucht werden, sondern ganze Partikelströme inklusive Kleinstpartikelanteilen. Diese Erweiterung ist insbesondere vor den Ergebnissen von Bremsstaubuntersuchungen, die u.a. durch Sachse (wie in [79]) ermittelt wurden, interessant, da nun eine deutliche Annäherung an die wahre Partikelgrößenverteilung berücksichtigt wird. Damit soll versucht werden, aus der zusammenhängenden Betrachtung aller neun Meßbereiche Korrelationen zu globalen Reibparametern, insbesondere dem Reibmoment, aufzuzeigen.

Zunächst soll das Verhalten bei **Stopbremsungen** vorgestellt werden. Für jeden der neun Meßpunkte bzw. –positionen werden jeweils drei Stopbremsungen ($n_{\text{ini}} = 200 \text{ U/min}$, $p = 8 \text{ bar}$) unmittelbar hintereinander durchgeführt. Bei Meßpunkt 1 beginnend werden so alle neun Meßpunkte erfaßt, wobei sich die Starttemperatur dabei für jeden Meßpunkt am gleichen Wert ($T = 50^\circ\text{C}$) orientiert. Die visuelle Betrachtung der lokalen Reibzonen in Abb. 7.48 offenbart bereits die ersten Besonderheiten, die sich für die durchgeführten Messungen einstellen.

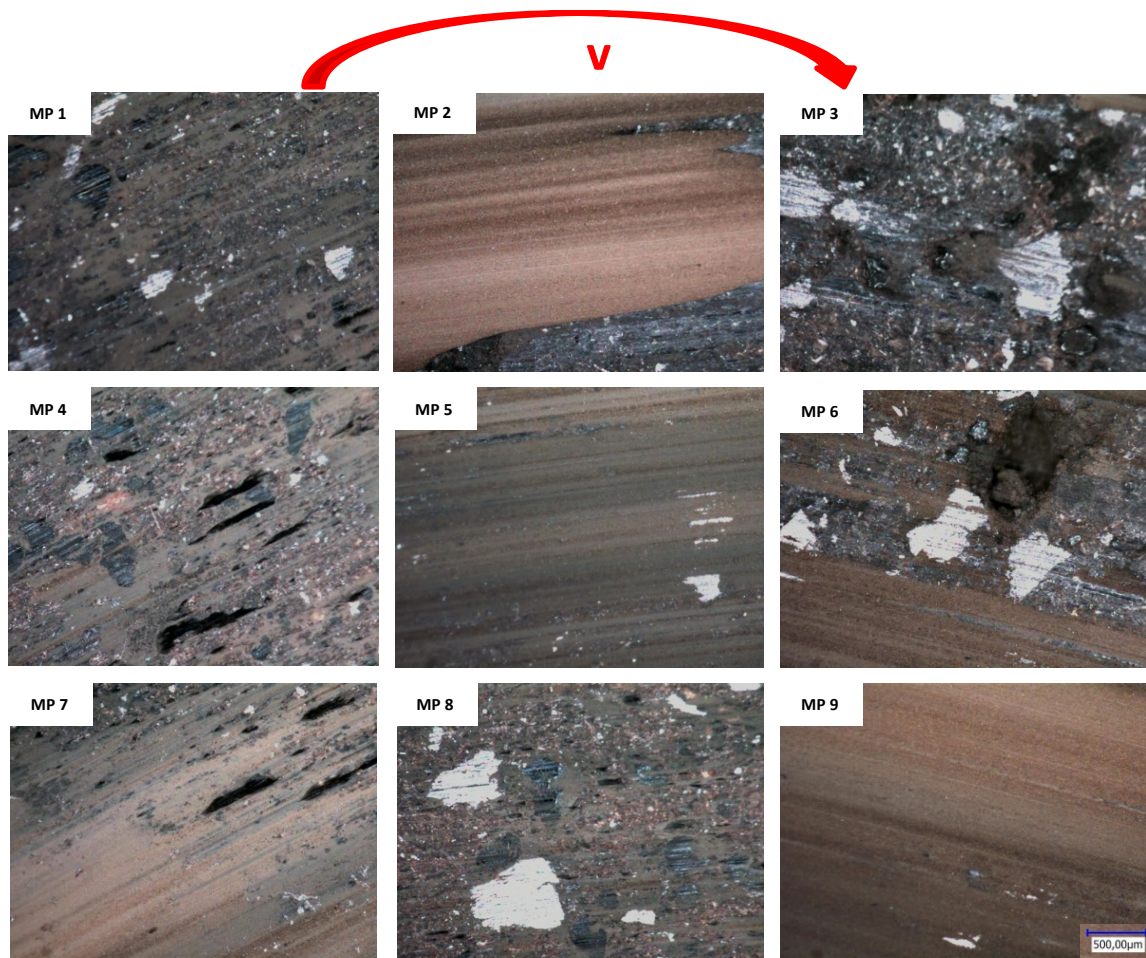


Abb. 7.48: lokale Reibzonenaufnahmen der Meßpunkte 1-9, jeweils zur Mitte der zweiten Bremsung (SN 2)

Im einlaufseitigen Bereich zeigt sich, daß sich alle drei Meßpunkte (MP 1, 4 und 7) an der Lastübertragung beteiligen und sich die Reibzone vollständig im Kontakt zur Glasscheibe befindet. Aufgrund der hohen Flächenpressungen kommt es zur Ausprägung von Sekundärpatches (Kompaktierung und Verfestigung von Abriebpartikeln). In der Belagmitte zeigt sich außen und in der Mitte (MP 2 und 5) eine geringere Flächenpressung, so daß sehr deutlich ausgeprägte Partikelströme bestehend aus Kleinstpartikeln die Reibzonen zunächst partiell, mit fortschreitender Dauer dann vollständig, überspülen können. Diese Ströme bilden ebenso einen dritten, sehr homogenen Reibkörper, übertragen jedoch nur geringere Reibkräfte. Der innere Reibring (MP 8) zeigt ein dem

Einlaufbereich analoges Verhalten. Auslaufseitig besteht im äußeren und mittleren Bereich (MP 3 und 6) kaum ein deutlicher Kontakt, so daß sich keine erwähnenswerten Oberflächenanpassungen einstellen. Lediglich zum inneren Reibring (MP 9) hin zeigen sich Überspülungen, die geringere Flächenpressungen erkennen lassen.

Eine Bestätigung der Zusammenhänge zwischen Flächenpressung und Ausprägung der Reibschicht zeigt Abb. 7.49. Es ist gut zu erkennen, daß bei geringer Flächenpressung (in diesem Beispiel ist der angelegte Bremsdruck gleich Null, jedoch besteht ein bestimmtes Restbremsmoment) der Bereich überspült wird.



Abb. 7.49: Übergang zwischen druckloser Phase und der Bremsdruckapplikation (von links nach rechts, Zeitintervall zwischen den Aufnahmen $t = 50$ ms), MP 4, SN 2

Nimmt die Flächenpressung zu, stellt sich die für den Einlaufbereich charakteristische Oberflächengestalt ein, Verfestigungspatches bilden sich aus. Auslaufseitig ist der äußere Reibring kaum in Kontakt, wodurch die Flächenpressung gegen Null tendiert, was sich in einer unveränderten Oberflächengestalt äußert. Ab etwa der Reibringmitte steigt die Flächenpressung und Ströme feiner und feinsten Abriebpartikel bilden sich aus.

Die Bereiche, die sich nicht an der Kraftübertragung beteiligen (MP 3 und 6), lassen erkennen, daß Veränderungen in der Reibzonenoberflächengestalt nur in äußerst geringem Maße auftreten. Sie werden im weiteren nicht näher untersucht, da sich die Oberflächengestalt de facto nicht verändert (MP 3 und 6). Daneben ist ein charakteristisches Verhalten im Überspülen mit großen Partikelströmen, die sich aus einer

Vielzahl von Kleinstpartikeln (keine Separierung möglich) zusammensetzen, zu beobachten (MP 2, 5 sowie 9). Die Kontaktzone ist durch den breiartigen Strom bestimmt, der sehr homogen die Reibkraft überträgt.

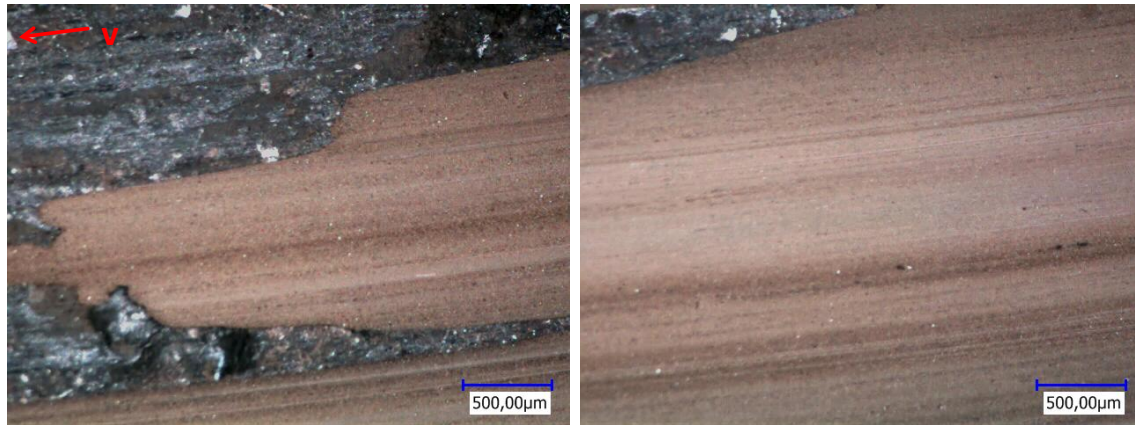


Abb. 7.50: einsetzende Überspülung mit Feinstpartikeln bei MP 2 zu Beginn von SN 1 (links), Ende von SN 3 (rechts)

Aus Abb. 7.50 ist zu erkennen, daß die Überspülung kontinuierlich einsetzt und innerhalb einer Bremsung und über mehrere Bremsungen (Folgebremsschritte) zunimmt. Daneben ist eine zweite Variante erkennbar, bei der die Überspülung zum Ende der Aktuierung abnimmt (Abb. 13.26). Sie setzt jedoch für jeden Bremsschritt jeweils neu ein. Auch ist zu beobachten, daß Reibzonenbereiche im Verlauf der Bremsung überspült werden können, wie Abb. 13.27 verdeutlichen soll.

Die reibkraftübertragenden Bereiche ohne Überspülungen (MP 1, 4, 7 und 8) sollen im weiteren näher untersucht werden. Der Fokus liegt demnach auf dem einlaufseitigen Bereich und soll helfen, das Verhalten der Kontaktbereiche im Hinblick auf das globale Bremsmoment zu analysieren. Diese werden in zweierlei Hinsicht charakterisiert. Zum einen in Form von losen Abriebpartikeln, die sich in Form von Partikelströmen bewegen. Diese weisen jedoch eine deutlich geringere Partikeldichte als die Ströme auf, die für komplette Überspülungen der Reibzonenabschnitte verantwortlich sind. Erfasst werden sie mittels einer automatisierten Bildauswertung unter Nutzung von Schwellwerten zur Binarisierung der Originalbilder (Abb. 13.28). Zum anderen werden Sekundärpatches betrachtet, die manuell

mittels Polygonzugmethode erfaßt werden (Abb. 13.29). Somit kann das dynamische Verhalten bzw. die dynamische Änderung der Reibschicht erfaßt werden.

Für alle Bremsungen gilt, daß das Bremsmoment keine auffälligen Unterschiede im qualitativen Verlauf zeigt. Schwingungen aufgrund der DTV (engl.: Disc Thickness Variation) sind erkennbar und äußern sich am Ende der Bremsung in Form einer deutlichen Überhöhung. In diesen untersuchten Meßreihen zeigt die Paarung VGS – NAO keine charakteristische Momentenüberhöhung zu Beginn der Bremsung (Initial Bite). Unterschiede im Momentenniveau können indes erkannt werden, so daß eine absolut exakte Vergleichbarkeit daher für das sequentielle Meßregime nicht gegeben ist. Aufgrund der qualitativ vergleichbaren Verläufe ist eine Gegenüberstellung der Messungen jedoch zulässig.

Eine Gegenüberstellung dreier Folgebremssungen, um mögliche Unterschiede innerhalb einer Bremssequenz aufzuzeigen, soll anhand des Meßpunktes 1 erfolgen (Abb. 7.51).

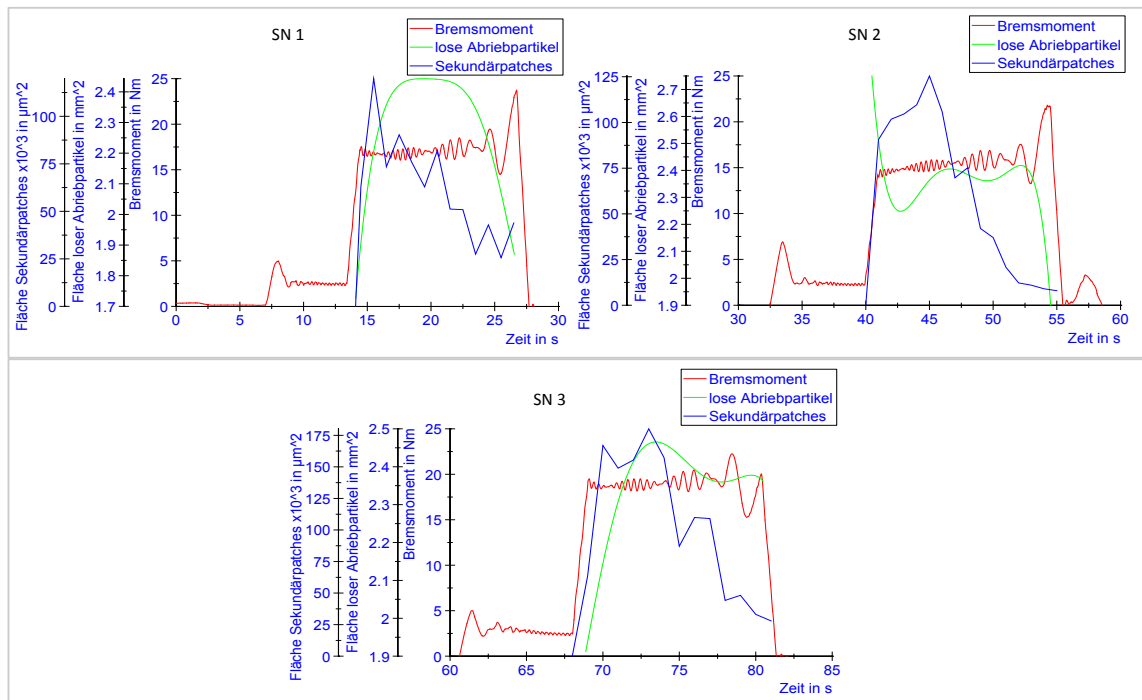


Abb. 7.51: Vergleich der Kontaktbereiche mit dem Bremsmoment für MP 1 (SN 1 – 3)

Die detektierte flächenhafte Bedeckung des Reibzonenausschnittes durch die Abriebpartikel ist zumeist von einem deutlichen und schnellen Anstieg geprägt. Es stellt sich im Verlauf der Bremsung ein zunächst annähernd konstantes Niveau ein. Zum Ende sinkt der Fluß an Partikeln dann zumeist deutlich, was mit der geringer werdenden Relativgeschwindigkeit (wodurch auch die Partikelgeschwindigkeiten sinken) und der sinkenden Entstehungsrate der Abriebpartikel erklärt wird. Die Sekundärpatches zeigen ein recht einheitliches Bild für die untersuchten Reibzonenausschnitte. Nach charakteristischem initialen, sprunghaften Anstieg der Sekundärpatchflächen stabilisieren sich diese und werden zum Ende der Bremsung wieder (deutlich) geringer. Dies bestätigt zum einen den deutlichen Anstieg der Sekundärpatches zu Beginn der Bremsung, wie bereits beim lokalen Verhalten vorgestellt (s.a. Kapitel 7.1), verdeutlicht aber auch, daß zum Ende der Bremsung die Patches wieder abnehmen können. Dies wurde zwar ebenfalls bereits vorgestellt, zeigt sich bei den hier vorliegenden Meßreihen bzw. Meßpositionen aber deutlicher.

In Bezug auf den Momentenverlauf zeigt sich, daß die Messungen mit höherem Momentenniveau auch größere Anteile an Sekundärpatch- und Partikelstromflächen aufweisen. Eine direkte Korrelation zwischen den zeitlichen Verläufen des globalen Reibmoments und den kumulierten Sekundärpatchflächen ist indes nicht erkennbar. Hinsichtlich der Partikelströme kann festgehalten werden, daß der qualitative Charakter (schneller, steiler Anstieg – annähernd konstante Zwischenphase – schneller, steiler Rückgang) zuweilen recht gut mit dem Moment übereinstimmt.

Der Vergleich aller Meßpunkte, die sich an der Flächenpressung in der Art von reibkraftübertragenden Bereichen ohne Überspülungen beteiligen, ist in Abb. 13.30 für die jeweils gleiche Bremsung (Bremsung SN 2) dargestellt. Dabei bestätigt sich prinzipiell das bereits bei Meßpunkt 1 erkannte Verhalten der durch lose Abriebpartikel und Sekundärpatches bedeckten Flächen in Bezug auf das globale Reibmoment. Es wird jedoch auch

deutlich, daß Unterschiede in den zeitlichen Verläufen durch Verlagerung der Flächenpressungsverhältnisse auftreten können.

Als Zwischenfazit läßt sich festhalten, daß die lokale Betrachtung unter globalem Bezug die detaillierte Reibzonenbetrachtung bei gleichzeitiger Kenntnis der globalen Kontaktbereichsverhältnisse erlaubt. Dabei zeigt sich, daß der untersuchte Reibbelag nicht vollständige und gleichmäßige Kontaktverhältnisse aufweist. So beteiligen sich die einlaufseitigen Bereiche deutlich an der Reibkraftübertragung, während die in der Belagmitte liegenden Bereiche geringere Flächenpressungen aufweisen und auslaufseitig mitunter kein oder nur sehr schwach ausgeprägte Kontakte mit der Bremsscheibe vorliegen. Solche Flächenpressungsverteilungen stimmen mit den Beobachtungen in Kapitel 7.5.3 überein und bestätigen damit die Sinnhaftigkeit dieses meßmethodischen Ansatzes. Eindeutige Korrelationen zwischen den Flächen loser Abriebpartikel und Sekundärpatches zum globalen Reibmoment hinsichtlich ihres zeitlichen Verhaltens lassen sich jedoch nicht aufzeigen.

Das Vorgehen bei den **Schleppbremsungen** ($n = 200 \text{ U/min}$, $p = 6 \text{ bar}$, $t = 30 \text{ s}$) erfolgt prinzipiell analog zu den Stopbremsungen, nur werden nun für jeden Meßpunkt zwei Bremsungen unmittelbar hintereinander ausgeführt, die jeweils 30 Sekunden andauern. Die Initialtemperatur beträgt für die erste Bremsung erneut 50 °C . Eine Darstellung der lokalen Reibzonen aller Meßpunkte während der ersten Bremsung (jeweils zur Mitte der Bremsung) erfolgt in Abb. 7.52. Die Erkenntnisse der Flächenpressungsverhältnisse bestätigen sich auch bei den durchgeführten Schleppbremsungen. Einlaufseitig zeigen sich sehr gute Kontaktverhältnisse für alle drei Meßpunkte. Die hohe Flächenpressung führt zu einer mitunter sehr deutlich ausgeprägten Bildung von kompaktierten und verfestigten Abriebpartikeln zu Sekundärpatches. In der Belagmitte weisen äußerer und mittlerer Bereich (MP 2 und 5) geringere Flächenpressungen auf, was zu Überspülungen mit Kleinstpartikelströmen führt. Diese bilden sich teilweise nur partiell in den Reibzonenausschnitten aus und überdecken folglich

Visualisierungsuntersuchungen zum in-situ Reibverhalten

nicht den vollständigen Bereich. Auch können sich die Bereiche wieder von den Überspülungen „befreien“, wie Meßpunkt 5 in der ersten Bremsung SN 1 erkennen läßt. Auslaufseitig weist der äußere Reibring geringe Flächenpressungen auf und wird überspült. In der Mitte zeigt sich zunächst ein schlechteres Kontaktverhalten, da sich kaum Oberflächenänderungen einstellen. Erst im Verlaufe der zweiten Bremsung setzt ein Überspülen bei Meßpunkt 6 ein, was die Verlagerung der tragenden Reibringe während der Bremsung verdeutlicht. Die Überspülung beginnt nach ca. 15 Sekunden der Bremsung und bedeckt zum Ende hin weite Teile des Reibzonenausschnittes, wie in Abb. 13.31 zu erkennen ist.

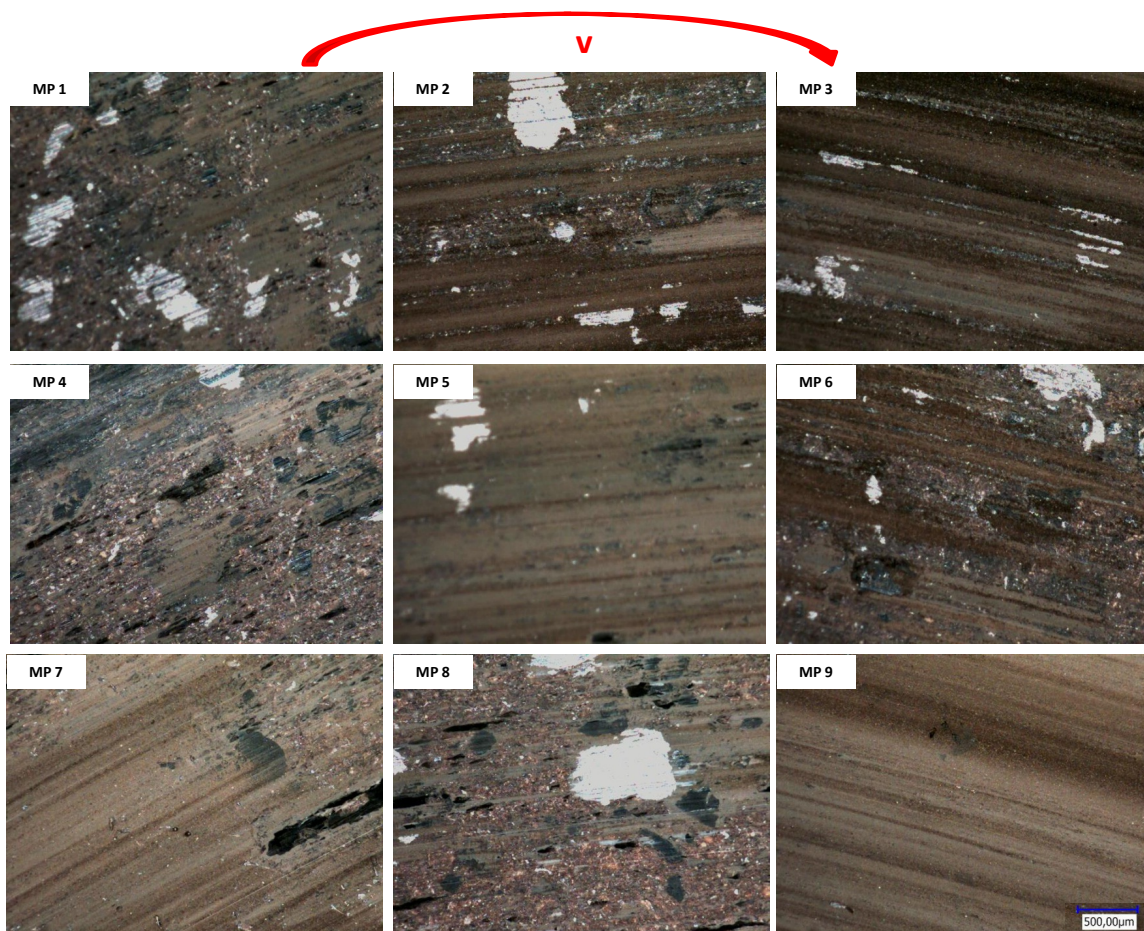


Abb. 7.52: lokale Reibzonenaufnahmen der Meßpunkte 1-9, jeweils zur Mitte der ersten Bremsung (SN 1)

Dies verdeutlicht nicht nur die geänderte Gestalt der Reibschicht bzw. des dritten Reibkörpers, sondern auch die geänderten Flächenpressungsverhältnisse sowie das Wandern des Reibrings. Auch für den inneren Reibring sind während der Bremsung einsetzende Überspülungen zu konstatieren (Abb. 7.53).

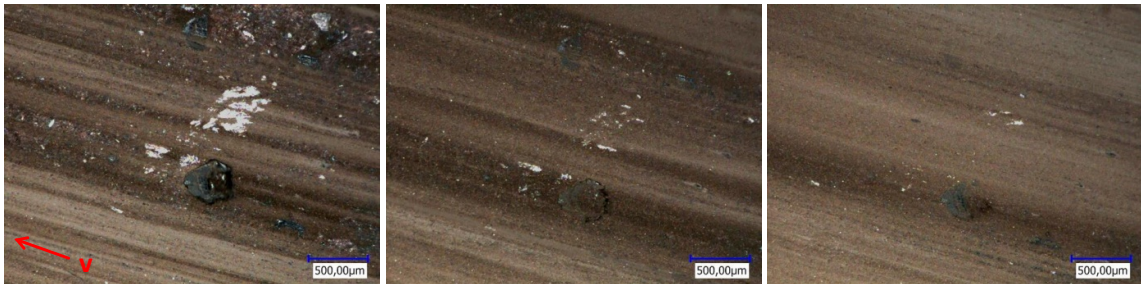


Abb. 7.53: einsetzende Überspülung von Kleinstpartikelströmen bei MP 9 zu Beginn (links), nach 1 s (Mitte) sowie nach 3 s (rechts) der Bremsung 1

Gut zu erkennen ist, daß zu Beginn der Bremsung, die Reibzone nur schwach ausgeprägte Partikelströme aufweist und die Unterschiede der Oberflächentopographie gut zu erkennen sind. Bereits nach einer Sekunde ist der komplette Reibzonenausschnitt mit einem dichten Strom von Feinstabriebpartikeln übersät, um nach weiteren 2 Sekunden noch stärker überspült zu werden. Schwach erkennbar ist jedoch noch immer der auffällige Kohlenstoffpatch. Bemerkt sei, daß dieser lose in der Reibmatrix verankert ist und anfänglich zu oszillierenden Mikrobewegungen neigt. Im weiteren wird der den Patch umrandende Spalt mit Feinstpartikeln gefüllt, so daß diese Mikrooszillationen nicht länger aufrechterhalten werden können.



Abb. 7.54: gesteigerte Überspülung von Kleinstpartikeln bei MP 9 zu Beginn (links), nach 2 s (Mitte) und nach 10 s (rechts) der Bremsung 2

Die folgende Bremsung zeigt zu Beginn eine Bedeckung mit Abriebpartikelströmen, die die markanten topographischen Bestandteile (z.B. den Kohlenstoffpatch) erkennen läßt. Im weiteren Verlauf der Bremsung setzt dann relativ schnell eine zusätzliche Überspülung ein, so daß sich ein noch dichterer und dickerer Partikelstrom zwischen den beiden Reibpartnern einstellt (Abb. 7.54). Damit wird deutlich, daß die Flächenpressung ebenfalls zunimmt, der betrachtete Reibzonenausschnitt vollständig mit dem dritten Reibkörper bedeckt ist und sich eine homogene Struktur zeigt.

Auch für die Schleppbremsungen sollen die reibkraftübertragenden Bereiche ohne Überspülungen, die im wesentlichen dem Einlaufbereich zugeschrieben werden können (MP 1, 4, 7 und 8) näher untersucht werden, um das Verhalten der Kontaktbereiche im Hinblick auf das globale Bremsmoment zu betrachten. Die Kontaktbereiche werden erneut hinsichtlich zweier Bestandteile, den losen Abriebpartikeln und Abriebpartikelströmen sowie den Sekundärpatches, die sich aus kompaktierten und verfestigten Abriebpartikeln zusammensetzen, charakterisiert.

Für alle Bremsungen gilt, daß das Bremsmoment keine auffälligen Unterschiede im qualitativen Verlauf zeigt. In der Initialphase ist eine deutliche Überhöhung (ähnlich einem Initial Bite), die nach ca. 2 bis 3 Sekunden abgebaut ist, zu erkennen. Anschließend fällt das Reibmoment leicht, bevor es sich (nach ca. 25 Sekunden Bremsdauer) stabilisiert und annähernd konstant verhält, wobei auffällige Schwingungen im Signal nicht zu erkennen sind. Nennenswerte Unterschiede im Momentenniveau können nicht erkannt werden. Aufgrund der qualitativ und quantitativ vergleichbaren Verläufe ist eine Gegenüberstellung der sequentiellen Messungen demnach zulässig.

Im weiteren folgt eine Gegenüberstellung zweier Folgebremungen (anhand von Meßpunkt 8), um mögliche Unterschiede innerhalb einer Bremssequenz aufzuzeigen (Abb. 7.55). Wie bei den Stopbremsungen zuvor

nehmen die losen Abriebpartikel mit dem Einsetzen des Bremsdrucks sehr deutlich zu. Auch wenn eine konstante Drehzahl zwischen den Applikationen beibehalten wird, sich das Hochlaufverhalten (Drehzahlsteigerung) weniger deutlich auswirkt und die Reibzone weniger Abriebpartikel in der Phase ohne angelegten Bremsdruck verliert, werden bestehende Patchstrukturen zwischen den Bremsungen deutlich abgetragen. Der Partikelstrom bewegt sich annähernd konstant bzw. seitwärts mit nur geringen Schwankungen. Dadurch, daß die Drehzahl nicht fällt, sinkt zum Ende der Bremsung im Gegensatz zu den Stopbremsungen der Partikelfluß nicht. Auch bei den Schleppbremsungen ist ein zunächst deutlicher, initialer Anstieg der Sekundärpatches zu erkennen. Dem schließt sich eine kurze Phase, in der die Patchflächen annähernd konstant bleiben, an, um dann im weiteren Verlauf sukzessive wieder zu fallen. Bezüglich der quantitativen Betrachtung zeigen beide Bremsungen keine signifikanten Unterschiede, so daß die ermittelten bedeckenden Flächen (Sekundärpatches sowie lose Abriebpartikel bzw. Partikelströme) und Reibmomente auf vergleichbaren Niveaus liegen.

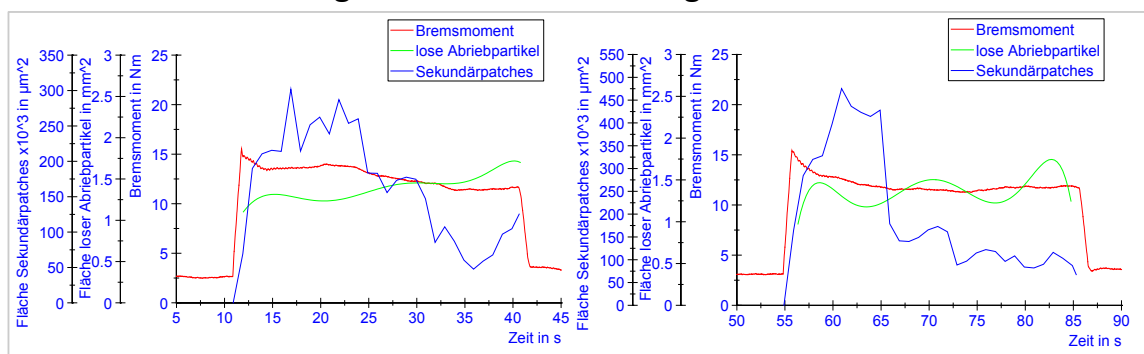


Abb. 7.55: Vergleich der Kontaktbereiche mit dem Bremsmoment für MP 8 (links: SN 1, rechts: SN 2)

Hinsichtlich des globalen Momentenverlaufs sind qualitative Zusammenhänge (zeitliche Verläufe) zu den Partikelströmen insofern nicht zu erkennen, als daß der zwischenzeitlich leichte Abfall des Moments bei den Partikelflächen nicht erkannt werden kann. Jedoch sind Seitwärtsbewegungen festzustellen, die auf ein global vergleichbares

Verhalten schließen lassen. Die Verfestigungspatches zeigen zudem bestimmte Analogien zum Momentenverlauf, wie den deutlichen und schnellen Anstieg, die kurze Phase eines annähernd konstanten Signalverlaufs sowie den anschließenden Rückgang bis zum Ende der Bremsung, wobei die Patches diesen deutlich ausgeprägter als das Reibmoment aufzeigen.

Die Betrachtung all derjenigen Meßpunkte (MP 1, 4, 7 sowie 8), die sich an der Reibkraftübertragung beteiligen, ohne deutlich auffällige Überspülungen von Feinstpartikeln aufzuweisen und demnach eine erhöhte Flächenpressung besitzen, erfolgt anhand von Abb. 13.32, jeweils für die Bremsung SN 1. Die von Partikeln überdeckten Flächen sind in ihrem zeitlichen Verhalten annähernd konstant über die Bremsung. Zu Beginn stellt sich ein deutlicher und schneller Anstieg ein. Die Sekundärpatches zeigen ein mitunter verschiedenes Verhalten, allen gemein ist jedoch der deutliche und schnelle Anstieg zu Beginn der Bremsung. Im weiteren können sich nahezu konstante Patchausprägungen zeigen, wobei auch deutliche Rückgänge oder Zuwächse zu erkennen sind, so daß allgemeingültige Aussagen schwer fallen. Der Vergleich zum globalen Reibmoment offenbart keine eindeutigen Korrelationen der Sekundärpatchflächen und auch ein gemeinsamer Trend die Partikelflächen betreffend ist nicht festzustellen.

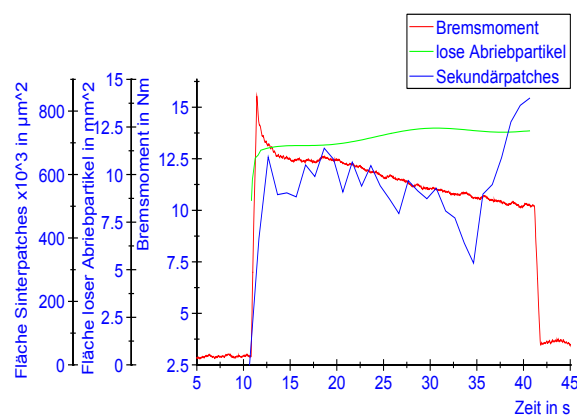


Abb. 7.56: Vergleich der aufsummierten Patch- und Partikelflächen zu einem Momentenverlauf

Daher werden die jeweiligen Flächenanteile aufsummiert und einem globalen Momentenverlauf gegenübergestellt, was aufgrund der qualitativ und quantitativ vergleichbaren Momentenverläufe zulässig ist (Abb. 7.56). Es zeigt sich ein leicht ansteigendes Verhalten der durch die Abriebpartikel bedeckten Flächen, was im Gegensatz zu dem leicht abfallenden Momentenverlauf steht. Die Flächen der Sekundärpatches scheinen über weite Teile der Bremsung mit dem Bremsmoment gut übereinzustimmen. Zum Ende steigt bei Meßpunkt 4 die Patchfläche jedoch so dramatisch an, daß sich dies auch auf die aufsummierte Fläche auswirkt und sich eine deutlichere Abweichung zum Moment ergibt.

Als Fazit ist festzuhalten, daß die lokale Betrachtung unter globalem Bezug eine genauere Reibzonenbetrachtung bei gleichzeitiger Kenntnis der globalen Kontaktbereichsverhältnisse zumindest teilweise zuläßt. Die Ausprägung nicht vollständiger und gleichmäßiger Kontaktverhältnisse konnte bei Stop- und Schleppbremsungen bestätigt werden. Demnach sind besonders die einlaufseitigen Bereiche der untersuchten Reibpaarung für die Übertragung der Reibkräfte entscheidend, während auslaufseitig die Flächenpressungen geringer ausfallen. Bezüglich der Bereiche, die den wesentlichen Traglastanteil übernehmen, können zwar Analogien zwischen den Kontaktbereichen und den globalen Momentenverläufen erkannt werden, lokale Phänomene wie Reibkraftverlagerungen indes verdeutlichen die Schwächen dieses Ansatzes, da sie nur bedingt berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Verhältnisse zwischen losen Partikelströmen (Berücksichtigung aller Partikelklassen) und kompaktierten Sekundärpatches kann für rein lokale Betrachtungen festgehalten werden, daß die Flächen letzterer mindestens um den Faktor 10 kleiner ausfallen als die der Partikelströme. Damit wird deutlich, daß sich der weitaus größte Teil an Partikeln nicht an der Sekundärpatchbildung beteiligt. Bestätigt wird dies auch durch die Betrachtung der für die verschiedenen Reibzonenanschnitte aufsummierten Flächenanteile, obgleich hier der Faktor mindestens 20 beträgt. Zusammenfassend wird konstatiert, daß

diese Methode eine weitergehende Charakterisierung der Vorgänge in der Reibzone zulässt, jedoch eindeutige Rückschlüsse auf das globale Reibverhalten aufgrund der Dimensionen der Reibzonenausschnitte nicht immer zu treffend sind und eine globale Reibzonenbetrachtung anzustreben ist.

7.5 Globales Patch- und Partikelverhalten

Die Erfassung der Kontaktflächen für die vollständige Reibzone ist das Ziel der globalen Patchanalysen. Dies ist jedoch verbunden mit einer geringeren Auflösung der Belagoberflächendetails, was besonders die Sekundärpatchanalysen beeinflusst. Verwendung finden hierfür zunächst das Objektiv Z2 (Anm.: Abbildungen der Reibzone sind seitenverkehrt aufgenommen und dargestellt!) sowie eine zusätzliche Beleuchtungseinheit, für die Analysen der Thermoelastischen Instabilitäten kommt eine digitale Spiegelreflexkamera zum Einsatz. Als Prüfling finden die VGS zusammen mit dem NAO-Belag Verwendung, geprüft werden Schlepp- und Stpbremsszenarien.

Für die Ermittlung der realen Kontaktflächen bzw. Flächentraganteilen bei **trockenen Reibversuchen** wird die Methode der automatischen Flächenbestimmung mittels NI Vision genutzt, wie sie bereits in Kapitel 7.4 beschrieben wurde. Ergänzend hierzu findet auch die manuelle Polygonzugmethode in Verbindung mit der Software „VW 9000 Motion Analyzer“ Verwendung. Damit soll es möglich sein, mit einer Messung direkt Korrelationen zwischen Reibmoment und realer Kontaktfläche aufzuzeigen.

Bei den anschließend durchzuführenden **Naßreibversuchen** soll neben den realen Kontaktflächenverhältnissen auch das Benetzungsverhalten charakterisiert werden. Letzteres bedient sich der automatisierten Flächenbestimmung mittels NI Vision, die Ermittlung der realen Flächentraganteile indes erfolgt unter Nutzung der manuellen Polygonzugmethode.

Die Analyse der **Thermoelastischen Instabilitäten** (TEI – Thermoelastic Instability) betrifft die Charakterisierung von Hotspots (Hot Spots) in der Reibzone, wobei der erhöhte Temperatureintrag in die Asperitkontakte (Glühkontakt) zu einem geänderten Bildkontrast führt. Hierfür wird im Gegensatz zu den Partikel- und Patchanalysen eine digitale Spiegelreflexkamera verwendet. Untersucht werden Schlepp- und Stoppbremungen separat, wobei die Vollglasscheibe VGS sowie die drei Belagkonzepte betrachtet werden.

Aufgrund der großen Datenmengen an Bild- und Videomaterial ist eine automatisierte Analyse sinnvoll. Die Ausgangsbasis stellen zunächst Einzelbilder dar, die mittels der digitalen Spiegelreflexkamera aufgenommen wurden. In einem ersten Schritt sind das Einzelbild zu laden und ein Maßstab zu definieren. Dies ist deshalb erforderlich, weil nicht nur die Anzahl der Hot Spots interessant ist, sondern auch deren Anteil an der Reibfläche. Über den Maßstab kann den ausgezählten Pixeln eine konkrete Weglänge zugeordnet werden. Im weiteren wandelt man die Farbaufnahme in ein Bild mit Graustufen, was die Basis für die Erzeugung eines Binärbildes darstellt. Zuvor wird jedoch noch eine Maske definiert, um sich auf die eigentliche Reibzone zu konzentrieren.

Die eigentliche Erkennung erfolgt über Schwellwerte, die sich an den Grauwertstufen orientieren (Binarisierung). Solche Schwellwerte werden zunächst automatisch festgelegt, ein manuelles Anpassen ist jedoch sinnvoll und erfolgt daher stets für die vorliegenden Bilddaten. In Abb. 7.57 ist zunächst zur besseren Verständlichkeit das zugeschnittene Grauwertbild dargestellt, nach dem der Erkennungsmodus bereits ausgeführt wurde. Ein vergrößerter Ausschnitt des anschließend erstellten Binärbildes sowie der direkte Vergleich mit dem Originalausschnitt sind ebenfalls abgebildet.

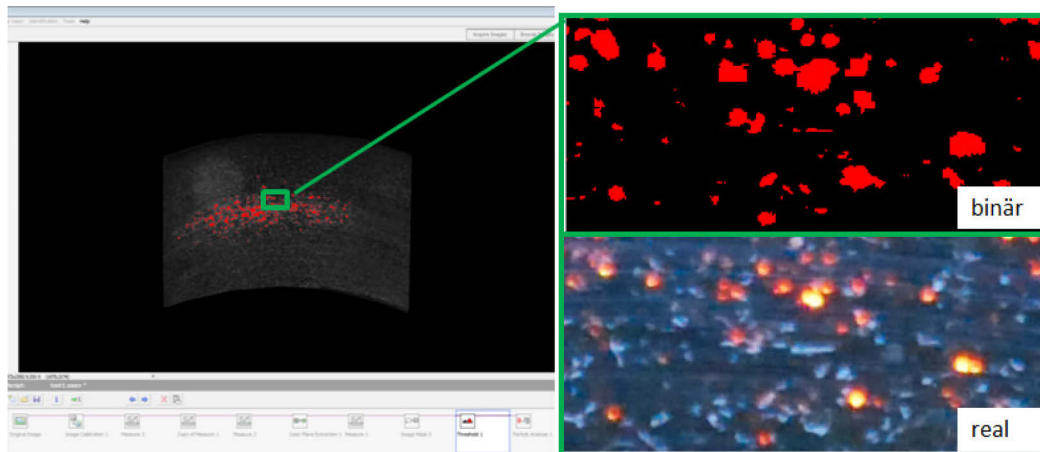


Abb. 7.57: Zugeschnittenes Grauwertbild nach der Erkennung (links) sowie der Vergleich zwischen Binärbild (rechts oben) und vergrößertem Originalausschnitt (rechts unten)

Im Ergebnis stehen die Anzahl der Hot Spots, deren Fläche als absoluter Wert sowie ihr Anteil an der gesamten Reibfläche. Daraus lassen sich Aussagen ableiten, wie sich die Hot Spots für verschiedene Betriebsparameter, Belagrezepturen und an verschiedenen Positionen (Ein-, Auslaufbereich, Reibradius) ausbilden.

7.5.1 Kontaktverhältnisse bei trockenlaufenden Reibpaarungen

Im folgenden soll das trockene Reibverhalten für Stop- und Schleppbremsungen untersucht werden. Die Durchführung der **Stopbremsungen** erfolgt anhand dreier, unmittelbar aufeinanderfolgender Bremsungen aus einer Startdrehzahl von 200 U/min in den Stillstand bei einem Bremsdruck von 8 bar. Die Betrachtung der Reibzone vor dem Hochlauf (Drehzahl $n = 0$ U/min) ist in Abb. 7.58, links, dargestellt. Dabei zeigt die Reibzone Sekundärpatches ebenso wie großflächige Ansammlungen von Feinstabriebpartikeln im Auslaufbereich, wie auch in geringerem Maße im Einlaufbereich.

Unmittelbar vor dem Einsetzen des Bremsdrucks (Abb. 7.58, rechts) haben sich, durch die DTV entstandene, Agglomerationen von Feinstpartikeln im Einlauf gebildet (s.a. Markierung).

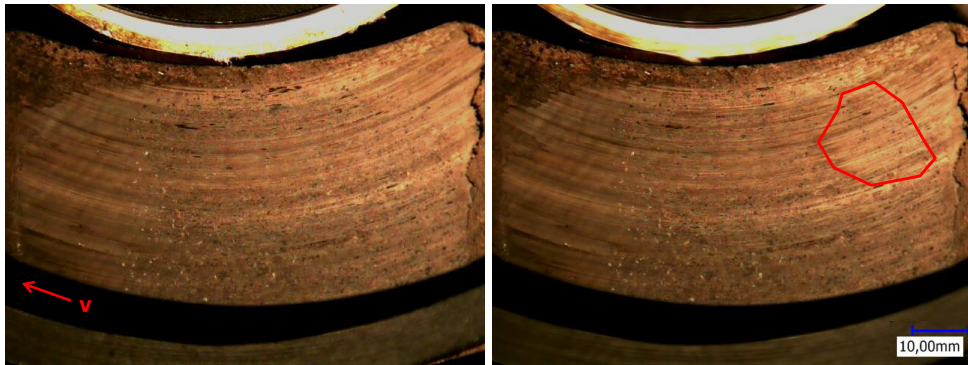


Abb. 7.58: Reibzone im Stillstand (links) sowie unmittelbar vor der Druckapplikation (rechts), Stopbremsung

Diese Bereiche, zusammen mit den im Auslauf befindlichen, zeichnen hauptverantwortlich für die Ausprägung des Restbremsmomentes und repräsentieren den dritten Reibkörper bzw. stellen sie die direkte Kontaktzone zwischen Belag und Scheibe dar. Die sich während der vorhergehenden Bremsung einstellenden Sekundärpatches, welche trotz der globalen Betrachtung als schwarze Kontrastbereiche in der Reibzone gut erkenn- und differenzierbar sind, wurden größtenteils abgetragen.

In Abb. 7.59, links oben, ist nochmals die Reibzone unmittelbar vor der Druckapplikation dargestellt. Markiert sind zwei zusammenhängende, jedoch unterschiedlich stark ausgeprägte Agglomerationsbereiche, die sich während der Drehzahlsteigerung bzw. der Zeitphase bis zum Druckanstieg, ausbilden.

Die Applikation des Bremsdrucks bewirkt zunächst in der Anfangsphase eine Verschiebung dieser agglomerierten Bereiche in tangentialer Richtung (Abb. 7.59, b). Dort bleiben sie zunächst bestehen, ein abrupter und vollständiger Zerfall nach dem durch die Druckapplikation bewirkten Verschieben erfolgt nicht. Wohl aber ist ein sukzessives Abtragen und Verkleinern dieser agglomerierten Bereiche zu beobachten (Abb. 7.59, c), so daß der Traganteil solcher zuvor als Überspülungen bezeichneten Phänomene geringer wird und erhabene und mechanisch robustere (härtere) Bereiche der Reibmatrix den Kontakt zum Reibpartner herstellen. Parallel dazu prägen sich erneut Sekundärpatches aus (Abb. 7.59, d).

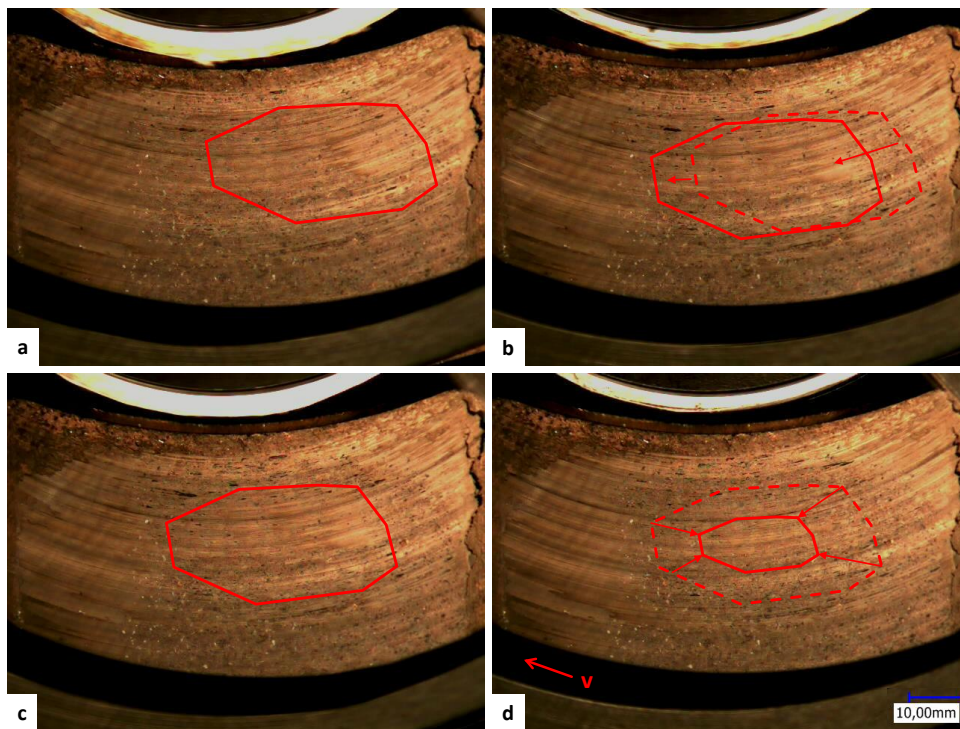


Abb. 7.59: Reibzone vor (a), während (b, c) und zum Ende (d) der Druckapplikation, Stopbremsung

Neben den Betrachtungen der Reibzonen sollen auch die kontaktrelevanten Bereiche dem globalen Bremsmoment in Abb. 7.60 gegenübergestellt werden. Erstmals ist es nun möglich, nahezu die komplette Belagoberfläche zu analysieren. Bei vergleichender Betrachtung der drei Folgebremssungen fällt auf, daß die qualitativen und auch quantitativen Verläufe für die Sekundärpatch- und Abriebpartikelflächen sowie das Bremsmoment vergleichbar sind und als repräsentativ gelten dürfen. Im Gegensatz zu den bisherigen lokalen Betrachtungen zeigen sich insbesondere für die Sekundärpatches nur geringe Abweichungen zwischen den einzelnen Bremsungen. Diese waren bei den lokalen Messungen auf Reibringverlagerungen zurückgeführt worden, so daß betrachtete Reibzonenausschnitte während der Messung aus der Lastübertragung zurückgenommen wurden, die globale Betrachtung indes erfaßt nun auch

die verlagerten Bereiche und zeigt somit auf, daß innerhalb einer Bremssequenz nur geringe Unterschiede bestehen.

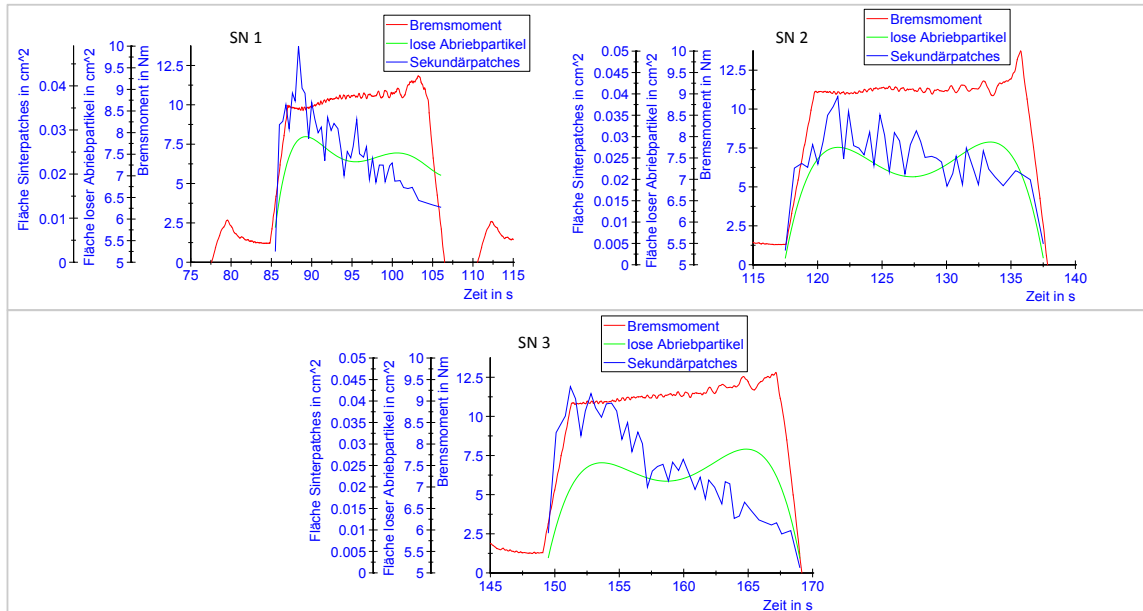


Abb. 7.60: Vergleich der Kontaktbereiche mit dem Bremsmoment für drei Folgebremsungen (Stopbremsung)

Das Momentensignal zeigt keine bedeutsamen Auffälligkeiten wie z.B. Überhöhungen. Nach einem schnellen und deutlichen Anstieg wächst es nur noch sehr geringfügig bis zum Ende der Bremsung an. Die Sekundärpatches steigen, wie bereits zuvor mehrfach erkannt wurde, sehr deutlich und schnell in ihrer flächenhaften Ausdehnung an, nehmen dann jedoch bis zum Ende der Bremsung kontinuierlich wieder ab. Eine Korrelation zum Moment mag sich demnach in einem gegenläufigen Verhalten äußern, wonach eine Zunahme der Sekundärpatches mit einer Abnahme des Reibmomentes und umgekehrt einhergeht. Zur Relativgeschwindigkeit scheint sich ein direkter Zusammenhang aufzeigen zu lassen: fällt diese, bilden sich auch weniger Sekundärpatches aus, da die Partikelströme langsamer fließen und die thermomechanische Belastung sinkt, was die Kompaktierung und Verfestigung erschwert. Die detektierten Flächen der losen Abriebpartikel (nicht der überspülten Bereiche!) bzw. Partikelströme zeigen tendenziell eine Seitwärtsbewegung mit leicht

ansteigendem Trend, was dem Momentenverlauf prinzipiell entspricht. Bei genauerer Betrachtung ist jedoch zunächst stets ein leichter Rückgang der Flächen zu beobachten, nach dem die losen Abriebpartikel ein Maximum nach der Druckapplikation erreicht haben. Trotz der abnehmenden Relativgeschwindigkeit steigt ab Mitte der Bremsung die bedeckte Fläche der losen Abriebpartikel wieder an, was mit den kleiner werdenden agglomerierten Bereichen (Überspülungen), die lose Abriebpartikel freisetzen, erklärt wird. Damit werden auch erhabene Kontaktbereiche der Reibmatrix freigelegt, die sich im restlichen Verlauf der Bremsung an der Lastübertragung beteiligen und für das dann leicht ansteigende Moment mitverantwortlich sind. Die Entwicklung der Partikel- bzw. Partikelstromflächen kann somit auch ein Indiz für freigelegte Reibzonenbereiche sein, die sich wieder an der Lastübertragung beteiligen, was letztlich ebenso den Momentenverlauf beeinflusst.

Im weiteren erfolgt die Betrachtung zweier **Schleppbremsungen** als Sequenz, um das Verhalten bei konstanter Relativgeschwindigkeit zu untersuchen.

Für die erste Bremsung SN 1 bilden sich nach dem Stillstand, bedingt durch die Drehzahlsteigerung und der DTV der Scheibe, flächenhafte Agglomerationen loser Abriebpartikel (Abb. 13.33, rechts, Markierung). Diese sind bereits aus den vorherigen Untersuchungen bekannt und verdeutlichen den Kontakt der beiden Reibpartner über den dritten Reibkörper bei jedoch geringerer Flächenpressung. Das Verhalten während der Bremsung wird vor dem Hintergrund von Besonderheiten im Momentenverlauf untersucht (Abb. 7.61 und Abb. 13.34). Die unmittelbar vor der Druckapplikation zu erkennenden Partikelagglomerationen verschieben sich innerhalb der ersten halben Sekunde der Bremsung in Drehrichtung, wie in Abb. 7.61, b, zu erkennen ist.

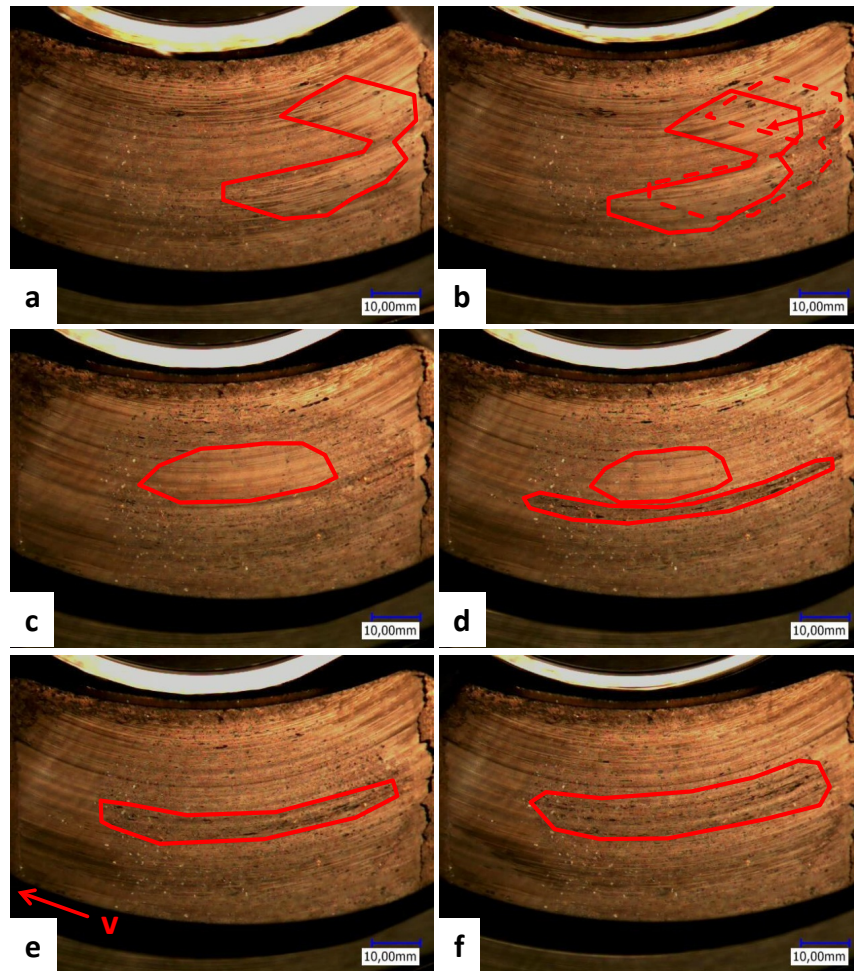


Abb. 7.61: Reibzone vor, während und zum Ende der Druckapplikation, Schleppbremsung

Dieser flächenmäßig recht beträchtliche Anteil verschiebt sich zunächst in tangentialer Richtung und verringert sich dann innerhalb der ersten 10 Sekunden der Bremsung (Markierung in der Abb. 7.61, c), wobei das Reibmoment, nach einem kurzen Rückgang, annähernd konstant bleibt. Es fällt jedoch im weiteren Verlauf (bis ca. 23 Sekunden nach Bremsbeginn), was einhergeht mit der Ausprägung von ersten Sekundärpatches. Jene bilden sich zunächst auf einem schmalen mittleren Reibring, wie in Abb. 7.61, d, zu erkennen ist. In den nächsten 15 Sekunden nimmt das Moment daraufhin leicht zu, während gleichzeitig die Bereiche der agglomerierten Feinstpartikel vollständig abgetragen werden und die Sekundärpatches nur

geringfügig zunehmen (Abb. 7.61, e). Daher können sich die Sekundärpatches sehr gut ausbilden, da die Reibmatrix freigelegt wurde, so daß sie auf einem deutlich breiteren Reibringbereich zu erkennen sind. Dieses Verhalten wiederum geht einher mit einem abfallenden Bremsmoment bis zum Ende der Bremsung (nach 50 Sekunden, Abb. 7.61, f). Im Anschluß an die Druckapplikation bilden sich erneut, bedingt durch die DTV, Bereiche der agglomerierten Abriebpartikel und bedecken die Reibmatrix (Abb. 13.35, rechts, Markierung).

Dies ist gleichzeitig der Ausgangspunkt für die Analyse der Folgebremmung (Bremsung SN 2). Zwischen den beiden Schleppbremsungen besteht nur eine recht kurze Zeitdauer (ca. 12 s), so daß sich zwar agglomerierte Bereiche mit Abriebpartikeln ausbilden, jedoch nicht so stark und deutlich wie bei Bremsung SN 1 (Abb. 7.62).

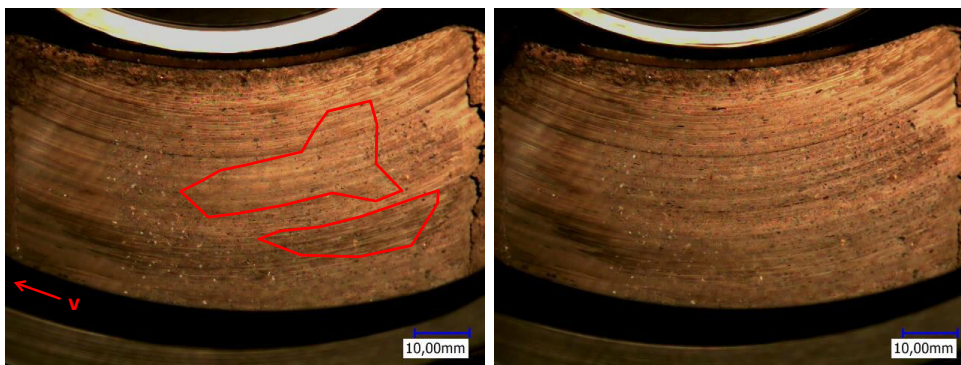


Abb. 7.62: Reibzone unmittelbar vor (links) sowie nach der Druckapplikation (rechts), SN 2

Dies führt dazu, daß durch das Anlegen des Bremsdrucks jene Bereiche leichter und schneller aus der Reibzone wegtransportiert werden können und weite Bereiche der Reibmatrix somit direkt an der Scheibe anliegen, was mit einem Abfall des Reibwertes zusammenfällt (Abb. 13.36).

Der angelegte Bremsdruck sorgt für eine erhöhte Flächenpressung, so daß weniger robuste, agglomerierte Abriebpartikel aus der Reibzone herausbefördert werden (Abb. 7.63, a). Die Basis für die Bildung von Sekundärpatches ist somit geschaffen, da sich diese direkt auf der Reibmatrix bilden. Sie prägen sich zunächst in der Nähe zum Einlauf auf

einem schmalen Reibringbereich (Markierung in Abb. 7.63, b) innerhalb der ersten 10 Sekunden der Bremsung aus, was einhergeht mit einem deutlich abfallenden Reibmoment. Dieser Bereich vergrößert sich in radialer und tangentialer Richtung sehr schnell und zeigt zahlreiche und sehr großflächige Plateaus (nach ca. 37 Sekunden, Markierung in Abb. 7.63, c), was zusammen mit einer Momentenstabilisierung erfolgt. Nach dem Ende der Druckapplikation zerfallen die meisten Sekundärpatches sehr schnell und nur wenige überleben (Markierung in Abb. 7.63, d), da die vorliegende Flächenpressung deutlich gesunken ist. Lose Abriebpartikel können sich nun wieder (DTV-bedingt) zu großflächigeren Agglomerationen verdichten.

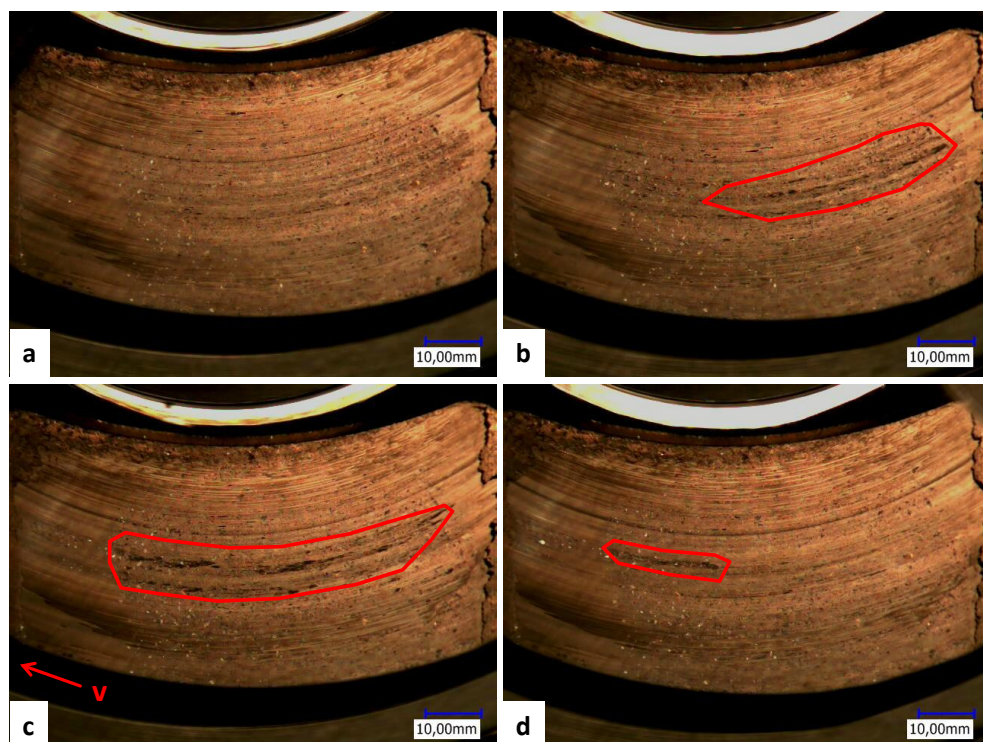


Abb. 7.63: Reibzone während und zum Ende der Druckapplikation, Schleppbremsung SN 2

In Ergänzung zu den rein visuellen Beobachtungen sollen zudem die ermittelten Flächen für Sekundärpatches und Partikelströme (loser

Abriebpartikel) den Momentenverläufen gegenübergestellt werden (Abb. 7.64).

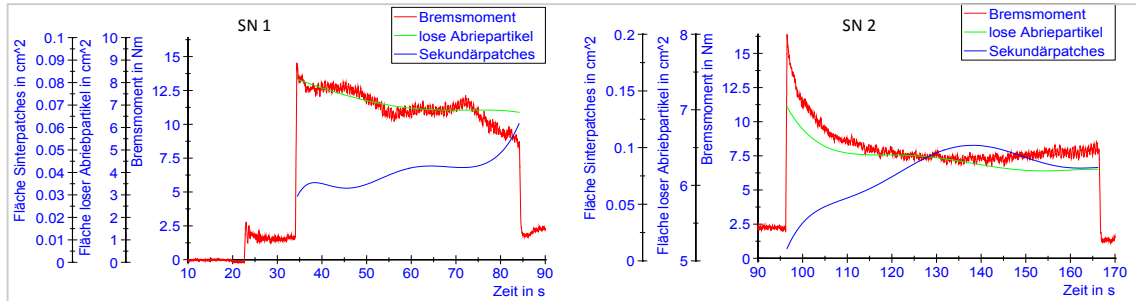


Abb. 7.64: Vergleich der Kontaktbereiche mit dem Bremsmoment für zwei Folgebremungen (Schleppbremung)

Bei den Bremsungen zeigt sich, daß sich die Ausbildung von Sekundärpatches zum Momentenverlauf konträr verhält, indem die Abnahmen des Momentes von Zunahmen der Patchflächen begleitet werden (und umgekehrt). In Phasen, in denen sich das Moment stabilisiert und annähernd konstant verhält, gilt gleiches für die Plateauflächen. Aufgrund der gleichbleibenden Relativgeschwindigkeit sind die Rahmenbedingungen für die Patchbildung über die komplette Bremsung günstig (hohes Partikelstromvolumen, welches kompaktiert und verfestigt werden kann), so daß sich tendenziell eine Zunahme der Plateaus ergibt, bevor sich ein Gleichgewicht einstellt (was auch mit einem konstanten Reibmoment einhergeht). Im Gegensatz dazu kann für die Flächen der Partikelströme ein dem Momentenverlauf analoges Verhalten festgehalten werden. Zwar werden die Besonderheiten im Momentenverlauf speziell bei Bremsung SN 1 nicht eindeutig wiedergegeben, der globale Trend jedoch ist erkennbar. Aus diesen Ergebnissen zeigt sich demnach, daß die Ausprägung von Partikelströmen auf das Momentenverhalten einen positiven Einfluß hat und dessen Niveau mitbestimmt. Gleiches gilt für die Sekundärpatches, obgleich diese im betrachteten Fall im Sinne eines hohen Reibmomentes weniger erwünscht sind. Dies läßt sich auch anhand des Modells von Bowden-Tabor begründen, da eine kleinere reale Kontaktfläche zu einem verringerten Reibkoeffizienten (bzw. Reibmoment)

führt. Diese Kontaktflächenverringering liegt durch die Ausprägung der Verfestigungspatches und deren erhabene Gestalt nachweislich vor.

Welche Rolle Abriebpartikel, die erneut in die Reibzone gelangen, spielen und welchen Anteil im Vergleich zu aktuell abgescherten Partikeln sie einnehmen, kann anhand der vorgestellten Ergebnisse nicht ermittelt werden. Wohl aber ist es zukünftig denkbar, daß aus der Reibzone ausgetretene Partikel, die am Reibring anhaftend über den Einlaufbereich erneut in die Reibzone eintreten, markiert und daher separiert werden können. Vor diesem Hintergrund wären auch geometrische Variationen des Einlaufbereiches (ohne und mit Chamfer, gerader und schräger Chamfer) interessant, um die wiedereintretenden Abriebpartikel gezielt beeinflussen zu können.

Als Fazit wird konstatiert, daß die globalen Betrachtungen Rückschlüsse aus der Reibzonencharakterisierung auf das Reibmoment zulassen. Die Abriebpartikelströme besitzen demnach einen wichtigen und positiven Einfluß auf das sich einstellende Bremsmoment, wohingegen die Ausprägung bzw. Zunahme der Sekundärpatches mit fallenden Momentenverläufen einhergeht. Besonders auffällig ist die Abhängigkeit der Sekundärpatches von der Relativgeschwindigkeit: bei Stoppbremungen bedeutet deren Verringerung auch die Abnahme der Sekundärpatches, da sich die Randbedingungen (Partikelstrom und –geschwindigkeit sowie Reibzonentemperatur) für deren Bildung verschlechtern. Bei konstanter Relativgeschwindigkeit indes nehmen die Plateaus sogar mit der Bremsdauer zunächst zu, bevor sich ein Gleichgewicht (aus Zerfall und Neubildung) einstellt, welches mit einem konstanten Reibmomentenverlauf korreliert. Die Betrachtung der Flächenanteile bestätigt die Erkenntnisse aus Kapitel 7.4, wonach die Flächen der Sekundärpatches deutlich geringer als die der Partikelströme ausfallen. Sie sind mindestens um den Faktor 20 kleiner, was bereits durch die aufsummierten Flächenanteile der verschiedenen Reibzonenausschnitte (Belagrasterung) gezeigt wurde und diese Methode in ihrer Bedeutung

unterstreicht. Die Reibschicht weist demnach einen maximalen Sekundärpatchflächenanteil von zirka 5% auf, während die Partikelströme und losen Partikel etwa 95% ausmachen. Damit zeigen sich die globalen Patchanalysen den lokalen im Hinblick auf Rückschlüsse auf das Reibmoment als überlegen. Für die Charakterisierung der Patchdynamik (Bildung, Bestehen, Zerfall, Patchinteraktionen) sind indes die hochauflöseren lokalen Analysen vorzuziehen.

7.5.2 Kontaktverhältnisse unter Nässeeinwirkung

Im folgenden sollen die Kontaktverhältnisse während und unmittelbar nach einer Benetzung sowie der Benetzungsgrad der Reibpaarung charakterisiert werden. Hierfür werden Schlepp- sowie Stopbremsung betrachtet.

Im Rahmen der **Schleppbremsungen** erfolgt die Benetzung während der Bremsung für eine Zeitdauer von ca. 2 Sekunden. Dadurch prägt sich ein Wasserkeil vor der Reibzone aus, welcher erst nach einer längeren Zeitdauer (ca. 70 Sekunden) verschwindet, womit die Voraussetzung für eine vollständige Abtrocknung der Reibzone geschaffen wird.

Es hat sich als zielführend im Rahmen von Voruntersuchungen gezeigt, daß zur Ermittlung der benetzten und trockenen Flächenanteile der Reibzone (grüne sowie rosafarbene Kennlinie in Abb. 7.65) ein Schwellwertverfahren unter Nutzung der Software NI Vision Verwendung findet.

Da diese Methode jedoch im Stadium des Abtrocknens Schwächen offenbarte, wurde sie um die bekannte manuelle Polygonzugmethode ergänzt. Mit ihrer Hilfe werden die Flächentraganteile ermittelt, die diejenigen Flächen repräsentieren sollen, die sich an der Reibkraftübertragung beteiligen. Es sei bemerkt, daß diese reibkraftübertragenden Flächenanteile sowohl trocken, als auch benetzt sein können.

Das Bremsmoment fällt nach dem Wasserangriff zunächst nur langsam und kontinuierlich (Abb. 7.65). Nach dem Erreichen eines Minimums steigt es in zwei kurzen, sehr dynamischen Phasen deutlich an, um anschließend auf einem dem trockenen vergleichbaren Niveau zu verharren. Der recht

deutliche Abfall der Reibung auf etwa ein Viertel des trockenreibniveaus wird nicht als Eigenheit der Glasscheibe aufgefaßt. Bereits in [18] wird vorgestellt, daß die Reibwerte bei Grauguß-Scheiben unter Nässeeinfluß auf zirka ein Viertel ihres ursprünglichen Wertes absinken.

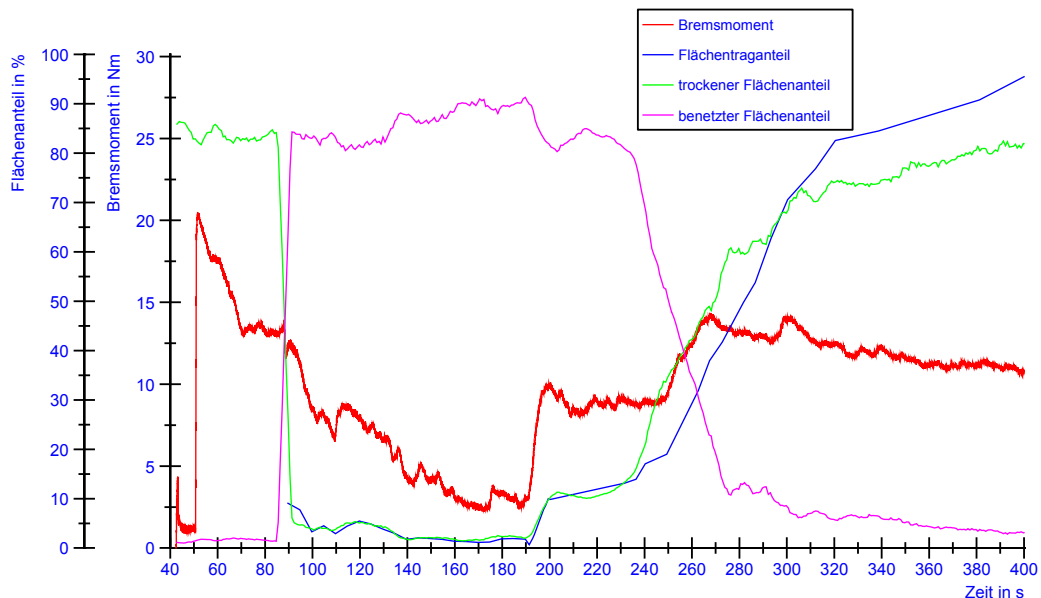


Abb. 7.65: Reibmoment und Benetzungsverhalten während einer Schleppbremsung

Der erste Eindruck der globalen Auswertung der in-situ Aufnahmen zeigt für die Phase der vollständigen Benetzung eine recht gute Übereinstimmung beider vorgestellter Analysemethoden, speziell die Übergangsbereiche (naß – trocken) sollen jedoch im weiteren näher betrachtet werden.

Zunächst ist das Initialverhalten der Benetzung detaillierter zu untersuchen (Abb. 7.66). Hierbei fällt auf, daß das Moment zwar fällt, jedoch kurzzeitig auch leichte Zunahmen erkennen läßt. Dieses Verhalten geben auch die Flächentraganteile wieder.

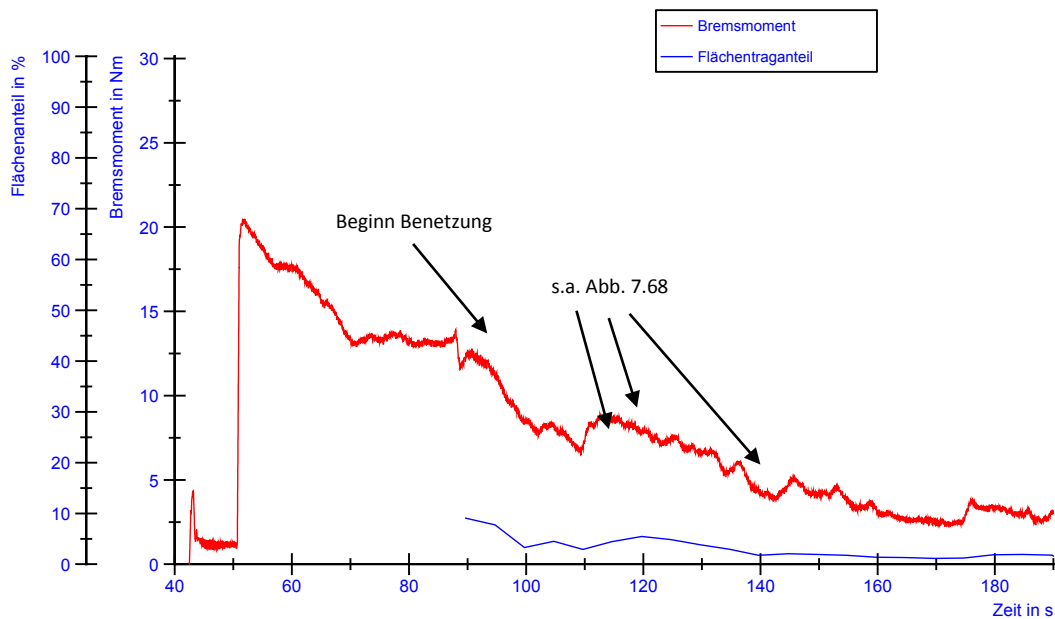


Abb. 7.66: Benetzung der Reibzone

Es zeigt sich anhand von Abb. 7.67, daß die Benetzung innerhalb von 3 Sekunden nahezu vollständig erfolgt (Benetzung führt zu einem dunkleren Kontrast).



Abb. 7.67: Reibzone während des Benetzungsvorgangs bei 88,08 s (links), bei 88,70 s (Mitte) sowie bei 90,82 s (rechts)

Somit weisen auch die tragenden Bereiche einen dünnen Wasserfilm auf (dünner als bei den umliegenden Bereichen). Diese Inhomogenität des Wasserfilms ist wichtig, da sie verdeutlicht, daß bestimmte Bereiche zwar benetzt sein, jedoch auch an der Lastübertragung teilnehmen können. Es ist demnach (auch analytisch) notwendig, in Flächentrageanteile und benetzte Flächenanteile zu unterscheiden. Die Flächentrageanteile sind an

der Reibkraftübertragung beteiligte Reibzonenbereiche, welche trocken oder mit einem nur dünnen Wasserfilm versehen sein können. Benetzte Flächenanteile weisen einen dünnen oder dicken Wasserfilm auf und können, müssen aber nicht an der Reibkraftübertragung beteiligt sein.

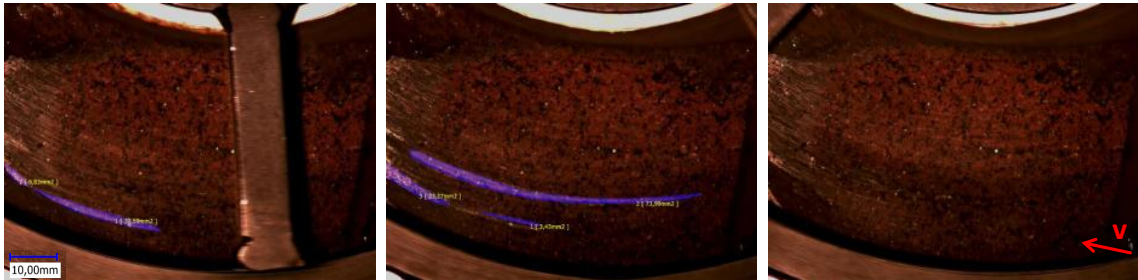


Abb. 7.68: Reibringausprägung bei 109 s (links), 113 s (Mitte) sowie bei 140 s (rechts)

Zwischenzeitlich kommt es nach der Benetzung zu einer Reibringverlagerung und damit sogar zu einem lokalen Abtrocknen, wie in Abb. 7.68 (links und Mitte) zu erkennen ist. Die radiale Ausdehnung ist jedoch nur sehr gering (ca. 2..3 mm), während die tangentielle Ausdehnung zunehmen kann und bis in den Einlaufbereich erfolgt. In der Folge wird dieser tragende Bereich jedoch wieder deutlich benetzt (durch umliegende Bereiche, in denen sich Wasser befindet), so daß er nicht mehr an der Lastübertragung teilnehmen kann und das Moment erneut fällt.

Demnach lassen sich Reibmomenteneinbrüche und –anstiege anhand der Analysen der Flächentraganteile und benetzten Flächenanteile erklären. Die Reibzone ist spätestens ab ca. 160 Sekunden in diesem Beispiel mit einem Wasserfilm versetzt, der das Moment auf ein Minimum herabsetzt. Die Abb. 7.69 verdeutlicht, daß sich zwei Dynamiken bzw. Abtrocknungsphasen einstellen und beobachtet werden können. Als Voraussetzung für beide Abtrocknungszyklen sei erwähnt, daß zunächst der sich vor der Reibzone bildende Wasserkeil aufgelöst haben muß, damit die beiden Abtrocknungsphasen einsetzen können.

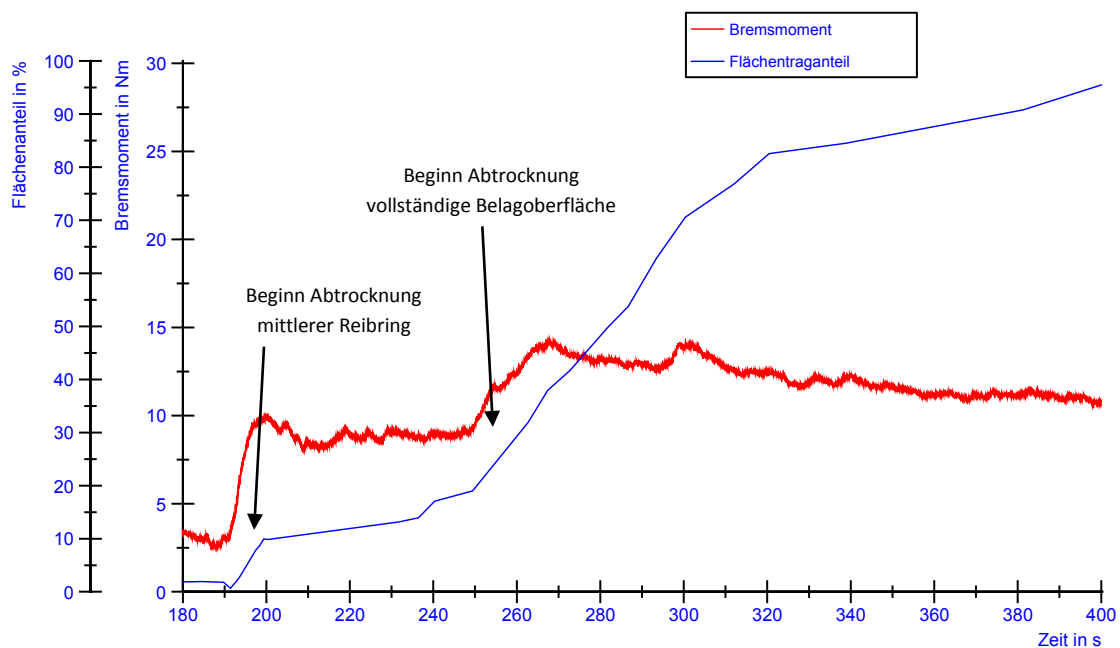


Abb. 7.69: Abtrocknung der Reibzone

Zunächst trocknet der mittlere Reibring ab, was einen ersten signifikanten Einfluß auf das Reibmoment hat, da es sehr stark in sehr kurzer Zeit ansteigt, wobei die Dynamik der der Abtrocknung des Reibringssegments entspricht (Abb. 7.70, blaue Markierungen entsprechen den abgetrockneten Flächen).



Abb. 7.70: Abtrocknung mittlerer Reibring bei 191 s (links), 196 s (Mitte) sowie 210 s (rechts)

Die Breite des tragenden Anteils wächst deutlich auf zunächst ca. 6 mm (nimmt im Verlauf der Bremsung weiter zu), was ausreichend ist für die signifikante Erholung des Reibmomentes. Nach einer Phase, in der das Moment annähernd konstant verharrt, stellt sich ein zweiter wichtiger

Abtrocknungszyklus ein, der die vollständige Belagoberfläche betrifft. Das Moment steigt zwar abermals deutlich an, diesmal jedoch langsamer (s.a. Abb. 7.69).

Aus Abb. 7.71 ist ersichtlich, daß, wenn der Reibring ca. 16..18 mm breit ist, das Reibmoment sich nahezu vollständig erholt hat (nach ca. 267 Sekunden).

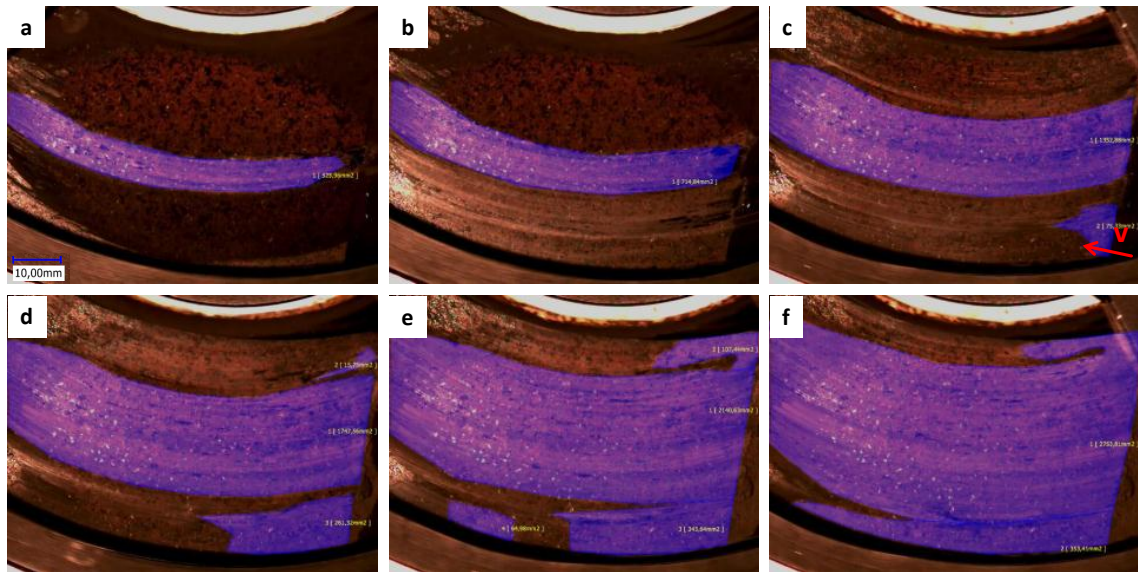


Abb. 7.71: Abtrocknung der Reibzone bei 236 s, 249 s, 267 s (Maximum von M_B), 286 s, 300 s sowie 320 s (a-f)

Für diese Reibpaarung sind demnach bereits ca. 40 % der nominellen Kontaktzone für eine erholte Lastübertragung ausreichend. Ab ca. 286 Sekunden (Abb. 7.71, d) ist im Bereich des äußeren Reibrings der Wasserfilm relativ dünn. Die Helligkeitswerte könnten darauf schließen lassen, daß er bereits abgetrocknet ist und sich an der Lastübertragung beteiligt. Tatsächlich trägt jedoch nur der mittlere Reibradius (welcher bereits eindeutig trocken ist). Insbesondere für solche Übergangszustände empfiehlt sich die manuelle Polygonzugmethode zur Bestimmung der realen Kontaktflächen (bzw. Flächentraganteilen), da die automatisierte Schwellwerterkennung aufgrund zu geringer Kontrastunterschiede nicht verlässlich genug arbeitet. Die Trocknung der Reibzone erfolgt von innen nach außen sowie im Einlauf beginnend und in Richtung Auslauf sich

fortsetzend. Dabei trocknen äußerer und innerer Reibradius simultan, obgleich eine Steigerung des Momentes nicht mehr zu beobachten ist.

Auch für die **Stopbremsungen** soll zunächst der zeitliche Verlauf des Reibmomentes sowie einer globalen, automatisierten Reibzonencharakterisierung bezüglich des Benetzungsgrades dargestellt werden (Abb. 13.37). Vorgestellt wird eine Stopbremsungssequenz, bei der die erste Bremsung (SN 1) vollständig trocken ist, während die Benetzung während der zweiten Stopbremsung (SN 2) nach ca. 2 Sekunden einsetzt. In deren Verlauf bleibt ein deutlich und gut zu erkennender Wasserkeil im Einlaufbereich bestehen, der jedoch durch den Scheibenstillstand verschwindet (Abb. 13.38). Die Auswertung erfolgt zunächst erneut automatisiert (mittels NI Vision) mittels Schwellwerten der Darstellung als approximierte Kurven. Das Reibmoment bricht nach der Benetzung deutlich ein, zum Ende der Bremsung erfolgt jedoch eine signifikante Momentenüberhöhung. Diese ist auch bei SN 3 zu konstatieren, flacht jedoch mit SN 4 bereits wieder stark ab. Betrachtet man die nassen Flächenanteile der Reibzone, ist eindeutig eine Korrelation erkennbar: nur bei einer ausgeprägten Benetzung erfolgt am Ende der Bremsung eine solche Momentenüberhöhung. Diese ist während der Prüfung auch akustisch durch ein Rattern wahrnehmbar, welches letztlich Stick-Slip Effekten, die sich durch die Benetzung einstellen, zugeschrieben wird. Nach drei Bremsungen hat sich die Reibzone bereits von der Benetzung größtenteils erholt.

Im weiteren soll zunächst das Initialverhalten der Benetzung näher charakterisiert werden (Abb. 7.72, links). Hierfür erfolgt eine manuelle Bestimmung der benetzten Flächenanteile der Reibzone, nach der sich eine nahezu vollständige Benetzung innerhalb von ca. 2,5 Sekunden einstellt (s.a. Abb. 7.73). Die automatisierte, schwellwertbasierte Methode zum Vergleich zeigt bei konstant gehaltenem Schwellwert Schwächen, da Bereiche mit dünnem Wasserfilm zum Teil noch als trocken detektiert werden. Dies liegt daran, daß die Helligkeitsschwellwerte ähnlich sind und

nur geringe Kontrastunterschiede vorliegen. Damit ist festzuhalten, daß diese Methode für Trends der Naß- / Trockenerkennung sowie immer dann geeignet ist, wenn trockene und nasse Bereiche im Analyseausschnitt vorliegen, so daß ausreichend hohe Kontrastunterschiede bestehen, nicht jedoch für die Bestimmung absoluter Flächenanteile. Ergänzend sei bemerkt, daß auch die Reibwertüberhöhung am Ende der Bremsung von dieser Methode nicht erfaßt wird.

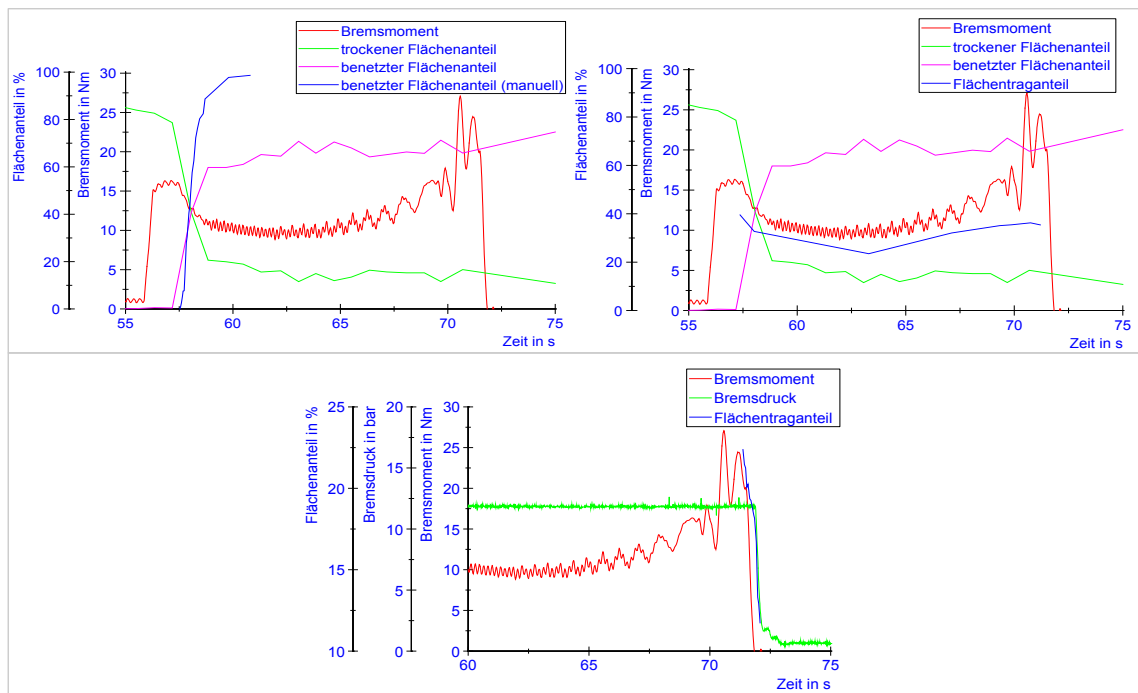


Abb. 7.72: Initialverhalten der Benetzung (links), Kontaktfläche über die Bremsung (rechts) sowie Kontaktflächenänderung zum Ende der Bremsung (unten), SN 2

Der Benetzungsvorgang läßt den Wasserfilm sich tangential in Richtung Auslauf ausbreiten, wie in Abb. 7.73 zu erkennen ist. Speziell die innersten und äußersten Bereiche sind schnell benetzt, da sie eine nur geringe Flächenpressung aufweisen oder gar nicht an der Lastübertragung teilnehmen. Im weiteren wird auch der mittlere Reibring benetzt, was mit einem Einbruch des Reibmomentes einhergeht. Die hohe Bedeutung des mittleren Reibring für die Lastübertragung wurde bereits bei den Schleppbremsungen vorgestellt und bestätigt sich demnach auch für die Stopbremsungen.

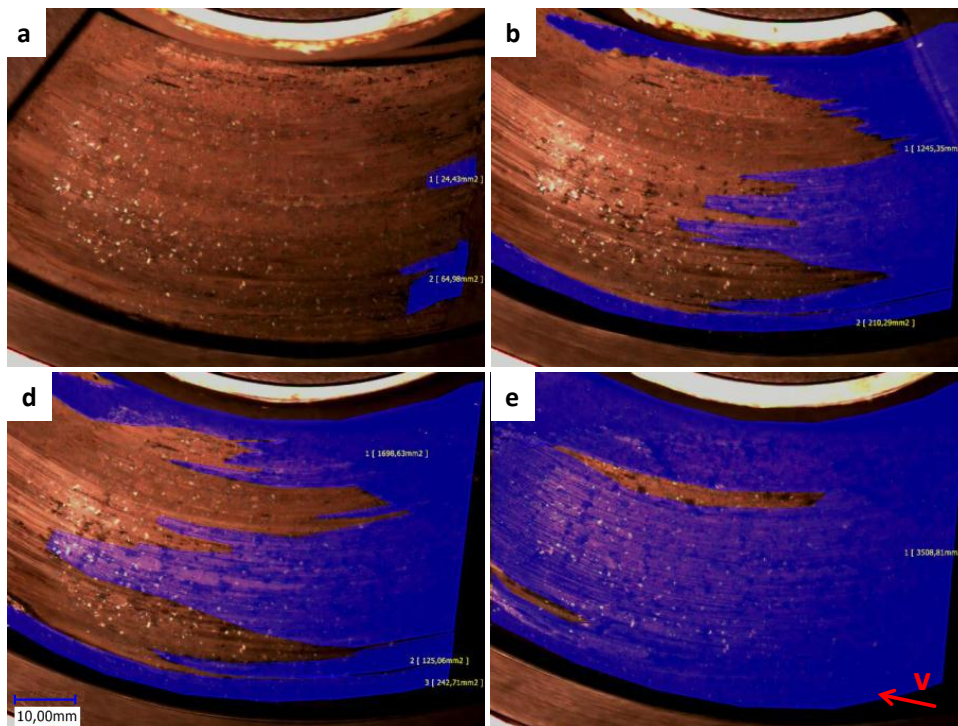


Abb. 7.73: Benetzung der Reibzone, SN 2 (bei 57,60 s, 57,95 s, 58,1 s sowie 59,8 s, a-e)

Das Verhalten der Flächentrageanteile (manuelle Bestimmung) über den kompletten Zeitverlauf der Bremsung SN 2 soll im weiteren betrachtet werden (Abb. 7.72, rechts). Die approximierte Kurve zeigt eine gute Korrelation mit dem Momentenverlauf und dokumentiert den anfänglichen Rückgang ebenso wie das Minimum und den darauf folgenden Anstieg zum Ende der Bremsung. Die deutliche Überhöhung wird jedoch auch hier nicht vollständig wiedergegeben. Die Kontaktzone zeigt hinsichtlich ihrer Flächentrageanteile keine solch dynamischen Änderungen, weshalb Übergänge zwischen Haften und Gleiten (stick-slip Effekte) für das Momentenverhalten verantwortlich gemacht werden. Jenes Übergangsverhalten kann mit den genutzten technischen Möglichkeiten optisch nicht aufgelöst werden.

Die Kontaktzone ist zum Ende der Bremsung bereits wieder relativ groß ausgeprägt (Abb. 7.74). Jedoch ist die Reibzone nach wie vor vollständig, obgleich nicht homogen, benetzt. Daher sind automatische Detektionen hinsichtlich der nassen und trockenen Bereiche für dieses Beispiel auch

nicht zielführend vor dem Hintergrund der Korrelation mit dem globalen Reibmoment. Hierfür ist die manuelle Detektion der realen Kontaktzonen, was jedoch zeitintensiver in der Bearbeitung ist, besser geeignet.



Abb. 7.74: Kontaktflächen während einer Stoppbremung (SN 2) bei 57 s (links), 63 s (Mitte), 71 s (rechts)

Das Verhalten während der Bremsdruckabnahme wird in Abb. 7.72, unten, näher betrachtet. Es erfolgt hierbei keine Analyse der vollständigen Kontaktfläche, sondern nur eines ausgewählten Bereiches, an dem sich der Druckabfall besonders gut darstellen läßt. Absolute Werte der Flächentraganteile sollten daher nicht mit vorherigen Analysen gegenübergestellt werden. Es läßt sich eine qualitativ gute Übereinstimmung mit dem Momenten- und auch Druckverlauf erkennen.

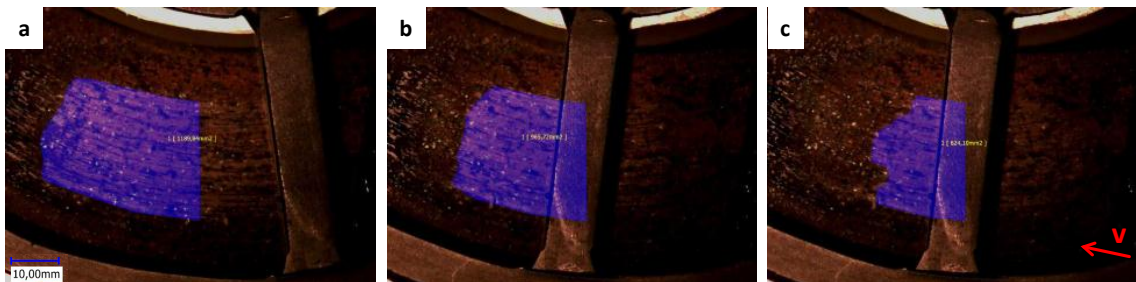


Abb. 7.75: Kontaktflächen während der Druckabnahme bei 71,27 s (links), 71,75 s (Mitte), 71,98 s (rechts), SN 2

Anhand der Reibzonenaufnahmen (Abb. 7.75) zeigt sich gut, wie sich die Kontaktfläche verringert, aber auch, daß sie nicht vollständig verschwindet. Somit läßt sich auch das relative hohe Restbremsmoment der Versuchsanordnung bestätigen. Die nun (nach dem Druckabbau) nicht im direkten Kontakt befindlichen Bereiche werden durch ihre benachbarten

Bereiche und den sich dort angesammelten Wasserfilmen erneut benetzt. Dies erklärt auch die nach der Bremsung (bei Drehzahl Null) leicht zunehmenden nassen Bereiche (bzw. abnehmenden trockenen Bereiche), die mittels der automatisierten Schwellwertmethode bestimmt wurden. Für qualitative Aussagen hinsichtlich des Benetzungszustandes ist dieses Verfahren demnach geeignet, wohingegen für detailliertere Charakterisierungen hinsichtlich der Korrelation zum globalen Reibmoment die manuelle Bestimmung der realen Kontaktflächen für die erste Bremsung der Benetzung (SN 2) zielführender ist.

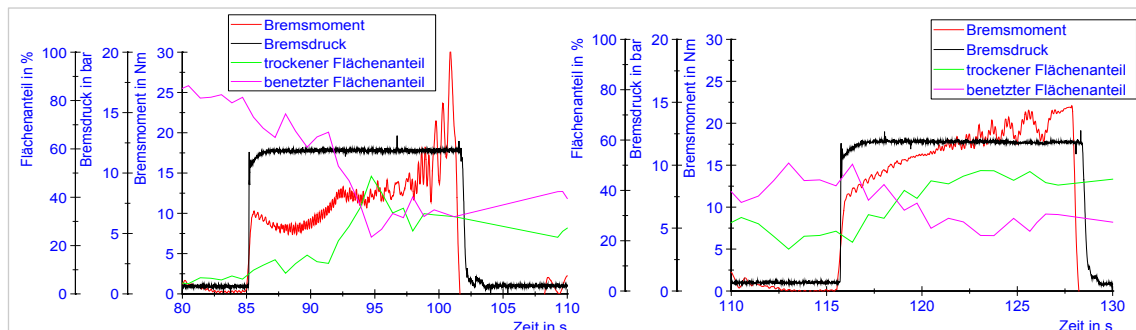


Abb. 7.76: Reibmoment und Benetzungsverhalten für SN 3 (links) und SN 4 (rechts)

Bei der dritten Bremsung (SN 3, diejenige, die unmittelbar auf die Benetzung folgt) ist auch die automatische Detektion der Naß-Trockenanteile gut geeignet, um qualitativ den Momentenverlauf zu erklären, wie Abb. 7.76, links, verdeutlicht. Zwar werden die Momentenüberhöhungen nicht wiedergegeben, was der optischen Auflösung der globalen Messungen, wie bereits ausgeführt, geschuldet ist. Die Verläufe bis zum Einsetzen dieser stick-slip Phänomene jedoch korrelieren gut. Die Ursache hierfür liegt darin, daß abtrocknende Bereiche, die die Lastübertragung übernehmen, und benetzte Bereiche die entsprechende Schwellwertunterschiede aufweisen, bei ausreichend hohen Kontrastverhältnissen unterschieden werden können. Bei SN 2 indes prägten sich keine abtrocknenden Bereiche aus, da die Reibzone vollständig, aber inhomogen benetzt war. Dies führt zu nur schwach ausgeprägten Kontrastunterschieden, die eine korrekte Detektion von Naß-

und Trockenanteilen verhindern, da Bereiche, die einen dünnen Wasserfilm aufweisen, fälschlicherweise als trocken detektiert werden. Bestätigt werden diese Erkenntnisse auch anhand von SN 4 (Abb. 7.76, rechts). Hier zeigen sich sehr gute Korrelationen zwischen den nassen bzw. trockenen Bereichen und dem Momentenverlauf. Auch sind nun keine stick-slip Artefakte in Form überhöhter Reibmomente am Ende der Bremsung erkennbar, da schon weite Bereiche der Reibzone wieder trocken gelegt sind. Die Darstellung der jeweiligen Bremsdrücke soll verdeutlichen, daß es sich um reibinduzierte Artefakte handelt, die nicht durch die Aktuierung begründet sind.

Als Fazit bleibt demnach festzuhalten, daß die Detektionen von Naß-Trockenanteilen der Reibzone in Verbindung mit der Bestimmung der realen Kontaktflächenanteile dazu geeignet sind, den Reibmomentenverlauf während und nach eines Benetzungsvorganges zu erklären, so daß direkte Zusammenhänge mit dem qualitativen Momentenverlauf erkannt werden können. Die hier untersuchte Reibpaarung neigt bei benetzter Reibzone zu deutlichen stick-slip Effekten, die jedoch aufgrund der globalen Reibzonenbetrachtung visuell auch deshalb nicht charakterisiert werden können, weil sie zu keinen dynamischen großflächigen Kontaktbereichsänderungen führen.

7.5.3 Thermoelastische Instabilitäten (TEI)

Im folgenden Abschnitt sollen die Zusammenhänge zwischen lokalem und globalem Reibverhalten näher untersucht werden. Dabei sind es speziell Thermoelastische Instabilitäten (TEI), die zu lokalen Hotspots in der Reibzone führen, die den globalen Temperatur- und Momentenverläufen gegenübergestellt werden. Geklärt werden soll, wie die Ausprägung, insbesondere die Intensität sowie die lokalen Bereiche, in denen sich die Hot Spots bilden, mit den globalen Reibgrößen im Zusammenhang stehen. Die Beobachtung der Reibzone unter Nutzung einer VGS für drei verschiedene Reibbeläge erfolgt zunächst anhand von **Schleppbremsungen** bei einer Drehzahl von 200 U/min sowie einem Bremsdruck von 6 bar. Eine

Kühlung ist nicht vorgesehen. Abweichend von NAO und ECE-kf konnten beim ECE-mk während der kompletten Schleppbremsung keinerlei Hotspots ausgemacht werden. Diese Aussage korreliert mit den jeweiligen Temperaturverläufen, die keinerlei Schwingungen aufzeigen und verdeutlicht somit, daß Schwingungen der Temperatursignale mit thermoelastischen Instabilitäten einhergehen. Dies wurde u.a. in [17] an Reibpaarungen von Krananlagen (organischer Reibbelag gegen Grauguß bzw. Stahl) nachgewiesen.

Die Betrachtung der globalen Betriebsparameter Bremsmoment sowie Temperatur beim ECE-kf offenbart charakteristische, periodische Verläufe. Auffällig sind die Schwingungen (mit großer Periodendauer), die zudem Korrelationen zwischen dem Moment und dem mittleren Temperatursignal erkennen lassen. Dies läßt darauf schließen, daß der mittlere Reibring für die Lastübertragung wesentlich verantwortlich ist. Das obere Temperatursignal (äußerer Reibring) weist zu einem niedrigeren Maximum auf, zum anderen läuft es dem Mittleren hinterher und antizipiert das Minimum des Momentensignals. Die schwingenden Temperaturverläufe lassen einen Wechsel der lasttragenden Bereiche zunächst lediglich vermuten, der jedoch durch die in-situ Analysen bestätigt werden wird.

Die Analyse der in der Reibzone entstehenden Hotspots offenbart zunächst, daß die Anzahl der Hotspots mit ihrer geometrischen Ausdehnung sehr gut korreliert. Daraus kann geschlossen werden, daß eine hohe Fleckenanzahl gleichbedeutend mit einer großen Flächenabdeckung ist und umgekehrt (Abb. 13.39).

Der zeitliche Verlauf der Fleckenanzahl zeigt ebenfalls sehr gute Korrelationen mit dem Momenten- sowie mittleren Temperatursignal (Abb. 7.77). Damit kann definitiv bestätigt werden, daß die beschriebenen Schwingungen mit den TEI in der Reibzone zusammenhängen bzw. durch diese verursacht werden. Auch erklärt sich das Maximum des oberen Thermoelements, da zu diesem Zeitpunkt zwar Moment und Fleckenanzahl

minimal sind, sich jedoch einige Hotspots auf dem äußeren (wie auch dem inneren) Reibring erkennen lassen. Somit muß zu jenen Zeitpunkten in diesen Bereichen jeweils die maximale Temperatur vorliegen.

Hinsichtlich des globalen Verhaltens zeigen sowohl die Hotspots, als auch das Bremsmoment einen leicht abfallenden Trend, was ebenfalls die enge Verbindung beider Größen widerspiegelt (Abb. 13.40). Dies zeigt, daß höhere Reibmomente auch mit größeren TEI verbunden sind.

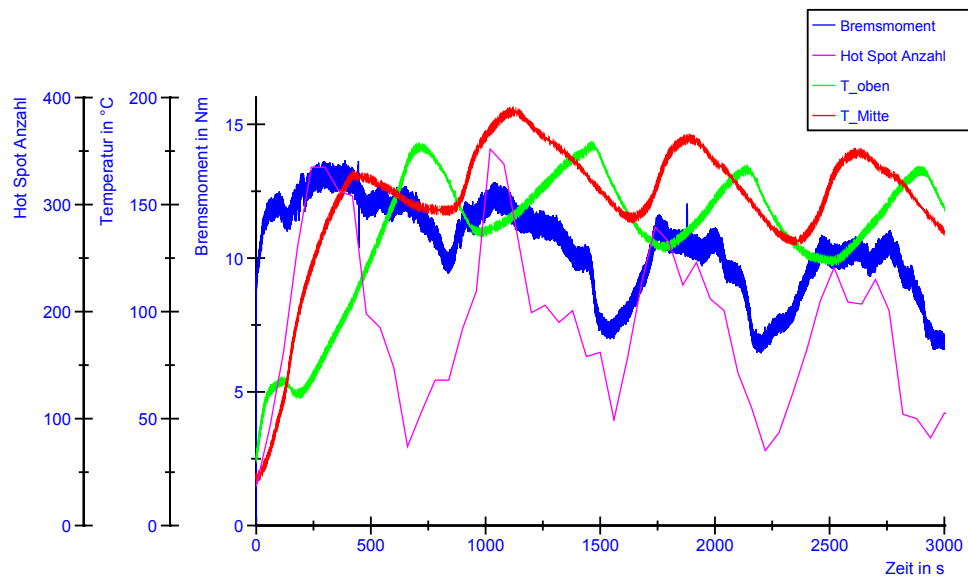


Abb. 7.77: Vergleich auftretender TEI mit globalen Reibparametern, VGS-ECE-kf (Schleppbremsung)

Im weiteren soll das Initialverhalten der Entstehung von Hotspots näher beschrieben werden (Abb. 13.41). Erste Hotspots sind in der Mitte der Reibzone (tangentialer Ausdehnung) für den inneren und äußeren Reibring zu erkennen. Diese verlagern sich anschließend zum mittleren Reibring, indem sie simultan nach außen bzw. nach innen wandern. Im Folgenden setzt eine Verlagerung zum Einlauf der Reibzone ein, die sich mit einer erneuten simultanen Wanderung der Hot Spots zu innerem und äußerem Reibradius überlagert. Im weiteren wandern die Hotspots periodisch jeweils zwischen mittlerem und dem äußeren bzw. inneren Reibring nahezu ausschließlich im einlaufseitigen Bereich. Aus diesem Verhalten wird

ersichtlich, daß die auftretenden Thermoelastischen Instabilitäten dem Typ IV (s.a. Kapitel 3.3) zugeordnet werden können.

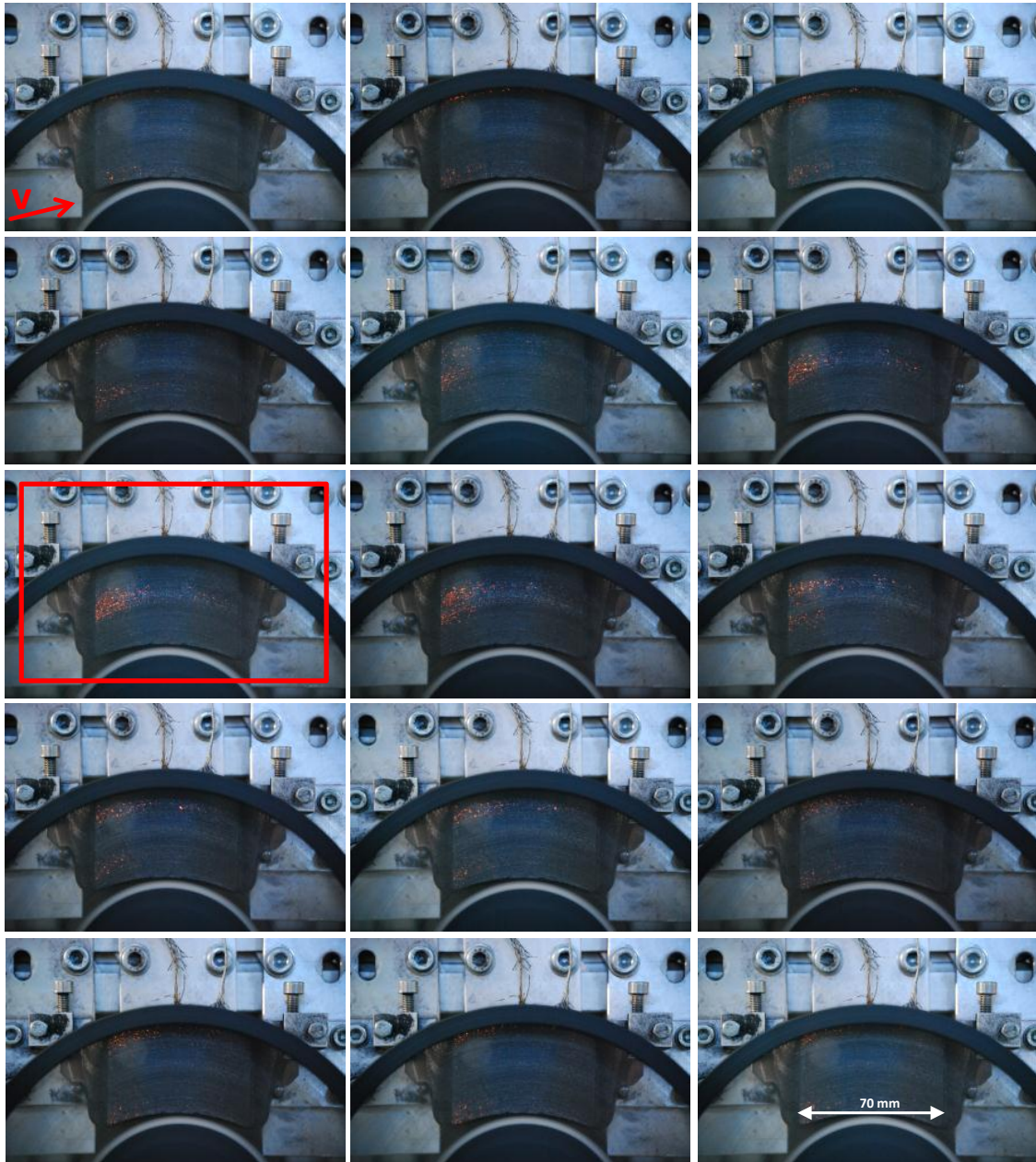


Abb. 7.78: Verlauf der TEI für eine Periode, VGS – ECE-kf

Das charakteristische globale und lokale Reibverhalten für eine Periode soll nun näher beschrieben werden. In Abb. 7.78 finden sich die in-situ Aufnahmen beginnend bei einem Minimum der Hitzefleckenanzahl, gefolgt

von ihrer Zunahme bis zu einem Maximum (rot markiert) sowie der anschließenden Abnahme bis zum erneuten Minimum (ein vollständiger Zyklus).

Zu erkennen ist eine deutliche Konzentration der Hotspots im Einlaufbereich über die gesamte Periode. Es werden demnach keine signifikanten Verlagerungen in tangentialer Richtung festgestellt. In radialer Richtung sind Verlagerungen indes deutlich zu erkennen. Die Hotspots wandern vom äußeren Reibring sowie zeitgleich vom Inneren zum mittleren Reibring. Dabei nehmen Hotspotanzahl und -fläche deutlich zu. Erreichen sie ein Maximum, welches gleichzeitig mit einem Maximum der mittleren Temperatur sowie dem Bremsmoment einhergeht, sinkt die Temperatur im äußeren Reibring (und auch im Inneren). Anschließend setzt die Verlagerung der in ihrer Anzahl und Fläche abnehmenden Hotspots in Richtung äußerer und innerer Reibring wieder ein. Die mittlere Temperatur und das Moment sinken, während das äußere Thermoelement steigende Werte anzeigt.

Bestätigt wird dieses Verhalten auch im Hinblick auf die jeweiligen Maxima von Moment, mittlerem Temperatursignal sowie Hotspotanzahl, wie in Abb. 13.42 zu erkennen ist. Dabei fällt auf, daß die Maxima der Hotspots sich stets auf dem mittleren Reibring einlaufseitig ausbilden. Für die fortschreitende Dauer der Schleppbremsung nimmt ihre Anzahl und Fläche leicht ab, wie bereits in Abb. 13.40 gezeigt wurde.

Betrachtet man die Bereiche bzw. lokale Hot Spot Ausprägung noch genauer, wird dieser periodische Charakter weiter bekräftigt (Abb. 13.43). Einzelne Asperitkontakte nehmen demnach immer wieder an der Lastübertragung teil und sind daher robust genug, über eine längere Dauerbelastung nicht zu stark zu verschleifen bzw. zerstört zu werden. Somit zeigt sich, daß trotz der vorgestellten Partikel- und Patchdynamiken bestimmte Bereiche der Kontaktzone, welche als klassische Primärplateaus charakterisiert werden können, sehr langlebig und für periodisches Reibverhalten verantwortlich sind. Theorien und Modellansätze wie z.B.

von Musiol in [5] geäußert, wonach Asperitkontakte bei der ersten thermischer Überbeanspruchung herausgerissen werden, sind damit widerlegt.

Auch beim **NAO** sind Schwingungen (jedoch mit größerer Periodendauer als beim ECE-kf) der Temperatur- und Momentensignale gut erkennbar (Abb. 7.79). Das Verhalten ist dabei vergleichbar mit dem des ECE-kf, so daß das mittlere Temperatursignal und der Momentenverlauf gut miteinander korrelieren, während die Temperatur des äußeren Reibrings (T_{oben}) der des Mittleren hinterher läuft und grundsätzlich niedrigere Maximalwerte aufweist. Das Temperaturniveau ist grundsätzlich deutlich niedriger als das des ECE-kf. Die Ausprägung von Hotflecken ist dadurch beeinflusst. Es bilden sich deutlich weniger Hotflecken als beim ECE-kf aus. Auch beim NAO korrelieren die Anzahl der Hot Spots mit ihren zugehörigen Flächen sehr gut (Abb. 13.44). Demnach genügt es, die Fleckenanzahl im weiteren zu betrachten und auf die flächenhafte Ausdehnung zu schließen.

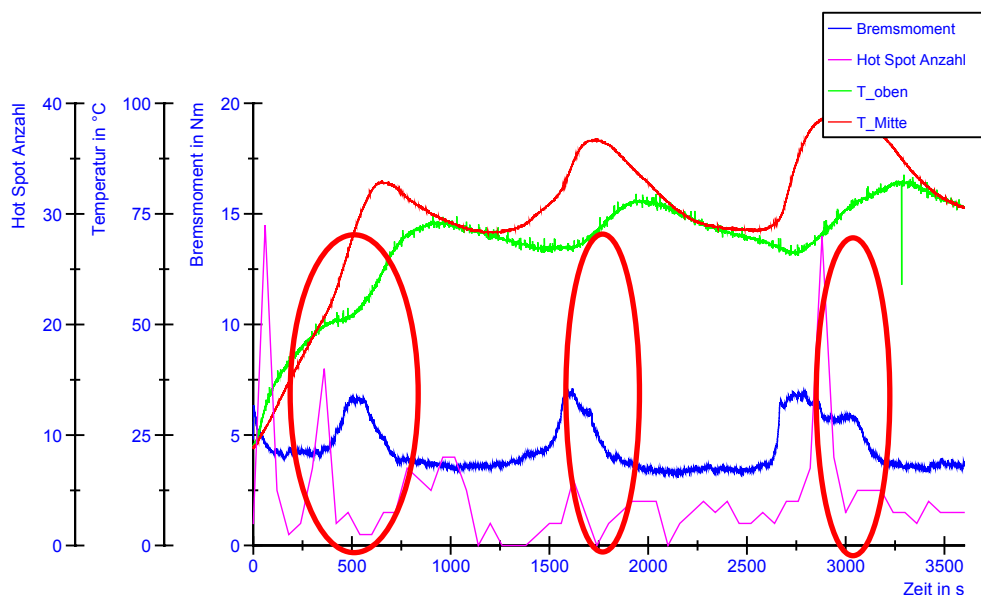


Abb. 7.79: Vergleich auftretender TEI mit globalen Reibparametern, VGS-NAO (Schleppbremsung)

Eine deutliche und gut zu erkennende Korrelation zwischen Hot Spots und Temperatur- sowie Momentensignal scheint auf den ersten Blick indes

nicht zu bestehen (Abb. 7.79). Daher sind drei Bereiche markiert worden, die näher betrachtet werden sollen. Während der erste markierte Bereich (links) Aussagen über das Initialverhalten ermöglichen soll, wird von den zwei weiteren markierten Bereichen (mittig sowie rechts) erwartet, daß sie wenigstens schwach ausgeprägte Korrelationen mit den globalen Reibparametern verdeutlichen können. Dies kann jedoch erst mit Hilfe der in-situ Aufnahmen bestätigt oder widerlegt werden kann.

Hinsichtlich des globalen Verhaltens zeigt sich kein Trend eines leicht abnehmenden Moments und Hotspots mit wachsender Schleppbremsungsdauer. Sein Moment bzw. die Maxima sind für die einzelnen Perioden nahezu konstant. Aus den in-situ Aufnahmen läßt sich erkennen, daß mit steigender Bremsdauer auch die Ausprägung der Hotspots zunimmt. Noch besser als an den erfaßten Hot Spot-Anzahlen kann dies mit dem Temperaturverlauf (mittleres Thermoelement) bestätigt werden, wo die Temperaturen (bzw. die Maxima) mit zunehmender Prüfungsdauer steigen.

Für das Initialverhalten kann konstatiert werden, daß die ersten Hotspots im Bereich des inneren und äußeren Reibrings gleichermaßen einsetzen (Abb. 13.45). In tangentialer Richtung sind sie in der Reibzonenmitte sowie einlaufseitig zu erkennen. In der Initialphase der Bremsung erfolgt eine Wanderung in Richtung mittlerer Reibradius sowie Einlauf der Reibzone.

Anschließend erfolgt eine Verlagerung der Hotspots nach innen bzw. außen. Das Niveau der auftretenden Hot Spot Zahlen ist dabei stets relativ gering. Somit kann auch für den NAO festgehalten werden, daß es sich um thermoelastische Instabilitäten des Typs IV handelt.

Auch wenn die Ausprägung der Hotspots zuweilen nur sehr schwach vorliegt, ist das Verhalten während einer Periode (ausgehend von einem Minimum erfolgt die Zunahme der Hot Spots bis zum Erreichen eines Maximums sowie der anschließende Abfall auf ein Minimum) beschreibbar (Abb. 13.46). Hierbei zeigt sich, daß die Hotspots zunächst wieder im

Bereich des inneren und äußeren Reibrings zu finden sind. Wie beim Initialverhalten gilt dies in tangentialer Ausdehnung für die Reibzonenmitte sowie den Einlaufbereich. Mit Zunahme der Hot Spots und dem Erreichen eines Maximums, was auch mit einem Maximum des Moments sowie der mittleren Temperatur einhergeht, wandern die Hotspots in Richtung mittlerer Reibring und, anders als in der Initialphase, Reibzonenmitte. Anschließend verringert sich das Hot Spot Aufkommen und die Hotspots verlagern sich abermals in Richtung äußerer und innerer Reibring, wobei sie die Reibzonenmitte und Einlaufseite bedecken können.

Die Analyse der verschiedenen maximalen TEI (Maximum von Moment, mittlerer Reibringtemperatur sowie Hotspotanzahl) läßt die Ausprägung der Hotspots im Bereich des mittleren Reibrings sowie der Reibzonenmitte (tangentiale Ausdehnung) erkennen (Abb. 13.47). Über die Bremsungsdauer nehmen die Hotspots von Maximum zu Maximum leicht zu und sind demnach für den dritten und letzten Zeitpunkt am besten zu erkennen.

Für den NAO sind keine sich wiederholt an der Lastübertragung beteiligten und zum Glühen angeregten Asperitkontakte festzustellen. Der Grund hierfür wird in seiner Materialzusammensetzung und Oberflächentopographie gesehen. Wie bereits die vorangegangenen Analysen zur Patchdynamik verdeutlicht haben, sind kaum harte und robuste Primärplateaus, wie sie beim ECE-kf vorhanden sind, beim NAO zu finden. Die deutlich zahlreicheren Sekundärplateaus bzw. die im Vergleich zu den Primärpatches weniger robusten Inhomogenitäten sind indes nicht in der Lage, über eine längere Zeitdauer zu überleben.

Neben dem Verhalten innerhalb einer Schlepptbremsung sollen im weiteren die Zusammenhänge während einer **Stopbremsung** erläutert werden.

Beim ECE-kf Belag korrelieren die Hot Spot Anzahl und die ermittelten zugehörigen Flächen gut miteinander (Abb. 13.48). Eine separate Betrachtung beider Größen ist daher nicht erforderlich, so daß sich im weiteren auf die Anzahl der Hotspots konzentriert wird.

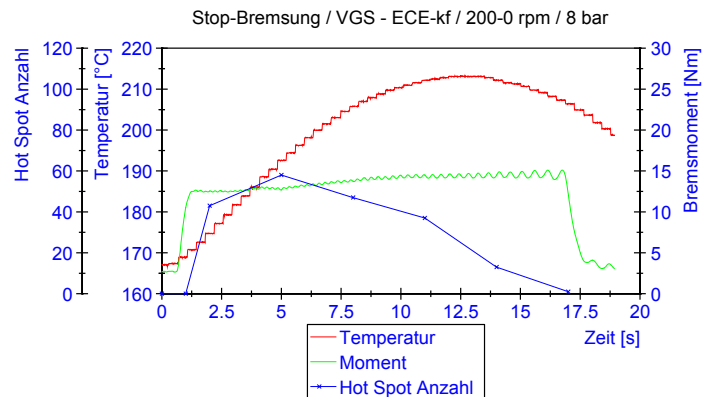


Abb. 7.80: Vergleich auftretender TEI mit globalen Reibparametern, VGS – ECE-kf (Stopbremsung)

Die Betrachtung der globalen Reibparameter offenbart für das (mittlere) Temperatursignal einen Anstieg mit dem Einsetzen und im Verlauf der Bremsung (Abb. 7.80). Es erreicht ein Maximum und fällt noch während der Bremsung wieder ab. Der Grund liegt im Kühlluftstrom und der sich verringernden Scheibendrehzahl bzw. geringeren umgesetzten Wärmeenergie. Das Bremsmoment verläuft bis zum Zeitpunkt $t = 5$ s annähernd konstant, um dann leicht anzusteigen. Hinsichtlich der detektierten Hot Spots ist in den ersten 5 Sekunden ein deutlicher und schneller Anstieg zu verzeichnen. Anschließend nehmen die Hitzeflecken kontinuierlich und langsam wieder ab, was durch die kleiner werdende Scheibendrehzahl in Verbindung mit der Kühlung erklärt wird. Eine direkte Übereinstimmung mit dem Temperatursignal wird indes nicht erkannt. Dies könnte daran liegen, daß das schleifende Thermoelement zeitlich verzögert reagiert.

Betrachtet man die in-situ Aufnahmen näher, so wird deutlich, daß zu Beginn der Bremsung sich die Hitzeflecken auf den äußeren Reibringen bilden, jedoch sehr schnell in Richtung mittlerer Reibring wandern (Abb. 7.81 – Vergleich der Bilder bei Sekunde 2 und 5). Für den Rest der Bremsung kommt es zu keinen deutlichen Verlagerungen mehr, so daß die Hot Spot Intensität stetig abnimmt, um am Ende der Bremsung fast vollständig verschwunden zu sein. Demnach bleibt das Moment konstant

bzw. fällt es niedriger aus, wenn die Lastübertragung vom inneren und äußeren Reibring auf den mittleren Reibring wandert.

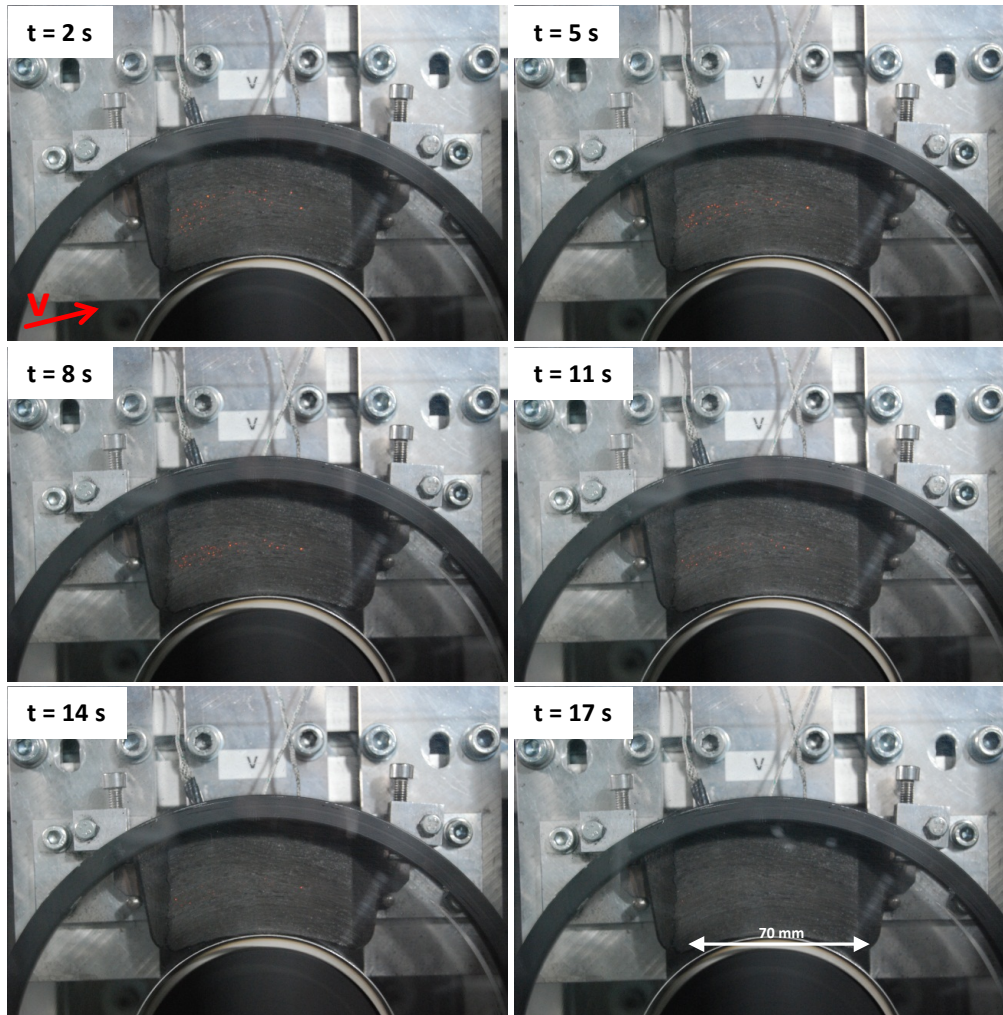


Abb. 7.81: TEI-Verhalten während einer Stoppbremung (bei Sekunde 2, 5, 8, 11, 14, 17), VGS – ECE-kf

Erfolgt die Kraftübertragung über den mittleren Reibring, steigt das Moment, wenn auch wie im gezeigten Beispiel nur leicht, an. Eine erneute Verlagerung der lasttragenden Bereiche (aufgrund thermischer Überlastung) findet für den Rest der Bremsung nicht mehr statt, da die Reibzonenintensität abfällt, was sich anhand der Hitzefleckenintensitätsabnahme belegen lässt.

Es bleibt festzuhalten, daß beim ECE-kf eine Verlagerung der lasttragenden Bereiche aufgrund thermischer Beanspruchung zu Beginn der Bremsung erfolgt. Diese Verlagerung auf den mittleren Reibring führt zu einem leicht ansteigenden Moment. Durch Kühlung und sinkende Relativgeschwindigkeit gibt es bis zum Stillstand keine weiteren thermisch bedingten Verlagerungen, so daß auch das Moment auf einem hohen Niveau verharrt. Somit zeigt sich, daß die Thermoelastischen Instabilitäten dem Typ IV zugeordnet werden können.

Die Anregung von TEI im Rahmen von Stopbremsungen ist für den **NAO** schwer zu erzielen, da sich nur äußerst selten Hot Spots in größerer Anzahl einstellen. Dennoch konnten einzelne Messungen umgesetzt werden, von denen eine exemplarisch im weiteren näher betrachtet wird.

Es zeigt sich eine gute Korrelation zwischen Hot Spot Anzahl und den zugehörigen Flächen (Abb. 13.49). Demnach bedeuten hohe Fleckenanzahlen auch große flächenhafte Ausdehnungen. Im weiteren sollen daher lediglich die Hot Spot Anzahlen betrachtet werden.

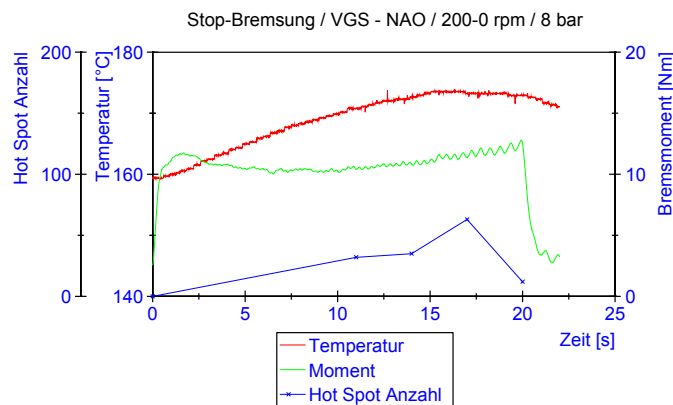


Abb. 7.82: Vergleich auftretender TEI mit globalen Reibparametern, VGS – NAO (Stopbremsung)

Die (mittlere) Temperatur steigt zunächst bis zu einem Maximum an, um anschließend noch während der Bremsung wieder abzufallen (Abb. 7.82). Auch in diesem Fall sind die zugeführte Kühlluft sowie die geringer werdende Wärmeenergie als Gründe zu nennen. Der Anstieg der Temperaturkurve erfolgt jedoch im Vergleich zum ECE-kf langsamer,

weshalb das Maximum auch erst später erreicht wird. Der Momentenverlauf zeigt nach einem in der Initialphase der Bremsung erreichten Maximum zunächst einen leichten Abfall, um dann etwa ab der Mitte des Bremsschrittes erneut anzusteigen. Betrachtet man die Anzahl der sich einstellenden Hotflecken, so muß zunächst einschränkend erwähnt werden, daß sich zu Beginn der Bremsung keine Hot Spots einstellen. Erst zur Mitte der Bremsung setzen diese ein und steigen auf ein Maximum, um anschließend noch vor dem Stillstand der Scheibe, wieder zu verschwinden. Das Auftreten der Hot Spots korreliert dabei gut mit dem Verlauf des Temperatursignals. Vermutlich führt die geänderte Wärmeleitfähigkeit der NAO-Beläge nicht wie beim ECE-kf zu einem zeitlich verzögertem Ansprechen des schleifenden Thermoelements.

Anhand der in-situ Aufnahmen zeigt sich, daß die Hotflecken erst zur Mitte der Bremsung einsetzen und nur im Bereich des mittleren Reibbrings auftreten (Abb. 7.83). Eine Verlagerung aufgrund thermischer Überlastung ist auch aufgrund der geringen noch verbleibenden Bremsdauer sowie fallenden Reibtemperatur nicht zu beobachten. Die Zunahme der Hotflecken geht einher mit einem Anstieg des Moments. Dies wird jedoch damit begründet, daß der mittlere Reibring die wesentliche Lastübertragung übernimmt, was auch durch die Zunahme der Hot Spot Intensität bestätigt wird. Der dann einsetzende Abfall der Reibtemperatur läßt auch die Hotflecken verschwinden, wobei der mittlere Reibring jedoch bis zum Ende der Bremsung den wesentlichen Teil der Kraftübertragung übernimmt, da das Moment nicht abfällt, sondern sogar noch weiter steigt. Obgleich für diese Randbedingungen keine radiale Verlagerungen erkannt werden konnten, wird dennoch davon ausgegangen, daß die TEI als Typ IV charakterisiert werden können, da der Grund für die nicht vorhandene radiale Verschiebung eher in den zu moderaten Belastungen als in einem geänderten TEI-Mechanismus gesehen wird.

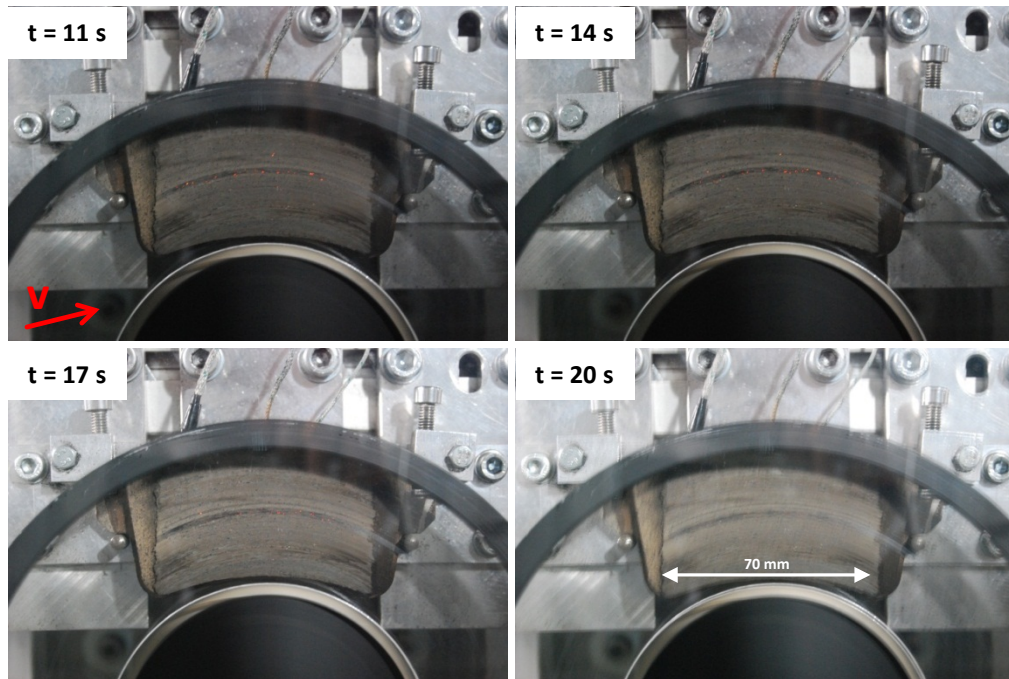


Abb. 7.83: TEI-Verhalten während einer Stoppbremung (bei Sekunde 11, 14, 17, 20), VGS – NAO

In Bezug auf die Stoppbremungen läßt sich für den NAO festhalten, daß sich die Entstehung von Hotspots im Vergleich zum ECE-kf deutlich unterscheidet. Während dieser zu Beginn der Bremsung einen schnellen und deutlichen Zuwachs an Hot Spots zu verzeichnen hat und es zu Verlagerungen der lastübertragenden Bereiche kommt, zeigen sich die TEI beim NAO erst recht spät während der Bremsung. Zudem werden auch keine thermischen Überlastungen und daraus resultierende Verlagerungen der lasttragenden Bereiche erkannt. Bei beiden Belägen sinkt jedoch schon vor dem Ende der Bremsung die Reibtemperatur wieder und die Hotspots verschwinden. Da das Moment bei beiden Belägen am Ende der Bremsung am höchsten ist, ist zu unterstellen, daß der mittlere Reibring den wesentlichen Teil der Kraftübertragung auch bis zum Ende der Bremsung leistet.

Zusammenfassend ist zu bemerken, daß mit Hilfe der in-situ Analysen erstmals thermoelastische Instabilitäten in der Reibzone bzw. auf der Belagoberfläche untersucht und somit ein Zusammenhang zu globalen

Reibparametern hergestellt werden konnte. Auch wenn die Ergebnisse nicht direkt auf Graugußbremscheiben aufgrund ihrer unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten übertragen werden dürfen, sind die Mechanismen doch vergleichbar. Dies bestätigen ebenso Ergebnisse der segmentierten Graugußscheibe, deren Graugußanteil ca. 90% der Reibringfläche ausmacht. Vorversuche zeigten ebenso die Ausprägung von Hitzeflecken in der Reibzone. Bemerkenswert ist jedoch, daß aufgrund der Einzelbildaufnahmen und hohen Belichtungszeiten mittels Spiegelreflexkammersystem die Segmentausschnitte verwischt dargestellt werden (Abb. 13.50). Schwingungen im Temperatur- und Momentensignal, wie sie bei Grauguß- und Borosilikatglasscheiben auftreten können, lassen sich, insbesondere für den ECE-kf, direkt mit TEI bzw. Hitzeflecken (Typ IV) in der Reibzone in Verbindung bringen.

8 Tribologische und physikalisch- / chemische Untersuchungen

8.1 Charakterisierungen des Reibverhaltens

Im Rahmen der reibcharakterisierenden Methoden sollen die Momenten- und Temperaturverläufe für verschiedene Prüfprozedere sowie Prüflinge untersucht werden. Ziel ist es dabei nicht nur, die Reibpartner tribologisch zu beschreiben, sondern auch zu prüfen, inwieweit das Reibverhalten der speziell präparierten Scheibenkonzepte VGS und SGG und das der konventionellen Graugußscheiben Analogien aufweist. Damit kann eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Glasversuchen auf konventionelle Graugußsysteme begründet werden.

8.1.1 Schleppbremsung

Zunächst sollen Grundsatzuntersuchungen ($n = 200$ U/min, $p = 6$ bar) zur radialen und tangentialen Temperaturverteilung unter Nutzung einer VGS vorgestellt werden. Hierfür wurde ein ECE-kf Belag als Reibpartner ausgewählt, während die Charakterisierung der verschiedenen Belagkonzepte im Anschluß an diese Analysen folgt. Auf die Darstellung des Reibmomentes wird bewußt verzichtet, da der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Charakterisierung des Temperaturverhaltens (örtliche und zeitliche Abhängigkeiten) liegen soll.

Aus Abb. 8.1 (links) sind Temperaturschwingungen deutlich erkennbar und es stellt sich ein harmonischer Schwingungszustand ein.

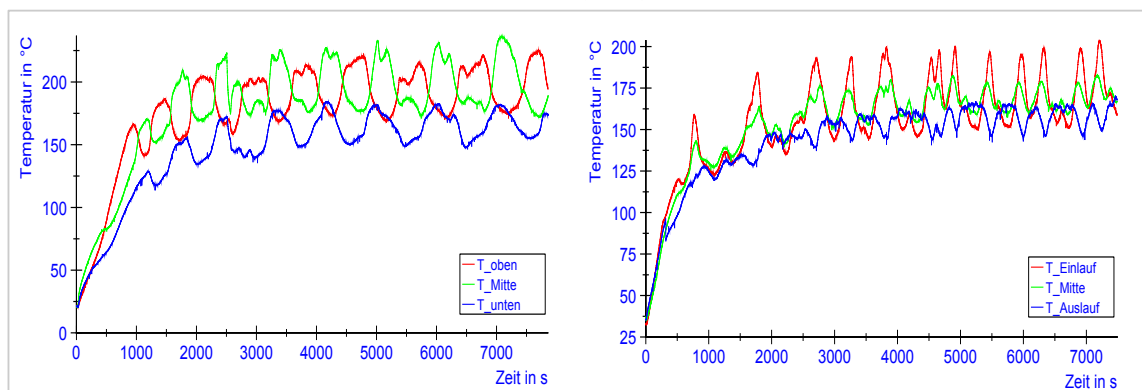


Abb. 8.1: radiale (links) und tangentiale Temperaturverteilung (rechts) für die Paarung VGS – ECE-kf

Dabei fällt auf, daß der innere (T_{unten}) und äußere (T_{oben}) Reibring in Phase schwingen, während das Signal in der Mitte (T_{Mitte}) um 180° versetzt schwingt. Es zeigt zudem die höchsten Temperaturwerte. Demnach wird erwartet, daß der mittlere Reibring ein anderes Verhalten in Bezug auf Thermoelastische Instabilitäten sowie die Reibkraftübertragung (Flächenpressungsverhältnisse) aufweist. Beides ist im weiteren zu untersuchen und zu bestätigen oder zu widerlegen.

Hinsichtlich der tangentialen Temperaturverteilung (Abb. 8.1, rechts) zeigen sich auch hier harmonische Temperaturschwingungen, die in Richtung Auslauf in ihrer Intensität (Amplitude) abnehmen. Während Einlauf und Mitte in Phase schwingen, ist der Auslaufbereich hingegen um 180° phasenversetzt. Es wird aufgrund dieser charakteristischen Verläufe erwartet, daß der Einlaufbereich eine bedeutende Rolle in Bezug auf die Reibkraftübertragung und mögliche TEI spielt. Gleiches sollte auch für die Mitte gelten, wohl aber in abgeschwächter Form, da beide in Phase schwingen, in der Mitte die Amplituden jedoch geringer ausfallen. Der Auslaufbereich könnte demnach weniger für die Lastübertragung von Bedeutung sein. Auch diese Erwartungen sollen durch die folgenden Untersuchungen bestätigt oder widerlegt werden.

Im weiteren werden die Ergebnisse der VGS in Kombination mit den drei Belagkonzepten vorgestellt. Ausgewertet werden die Verläufe des Bremsmomentes (M_B) sowie der mittleren und oberen Belagtemperatur (T_{oben} und T_{mitte}).

Bereits im Bedding wird beim **NAO** deutlich, daß der mittlere Reibring (T_{mitte}) ein höheres Temperaturniveau aufweist als der obere Reibring (T_{oben}), welcher in seinem Verlauf dem mittleren Reibring zudem hinterher läuft. Die Kurvenverläufe von T_{mitte} und M_B korrelieren gut miteinander, Anstiege und Einbrüche erfolgen für beide nahezu ohne zeitlichen Versatz. Während bei 100 U/min keine Auffälligkeiten vorliegen (stationärer Reibzustand), zeigen sich bei 200 und 300 U/min deutliche Schwingungen kleiner Periodendauer im Momentensignal, überlagert von

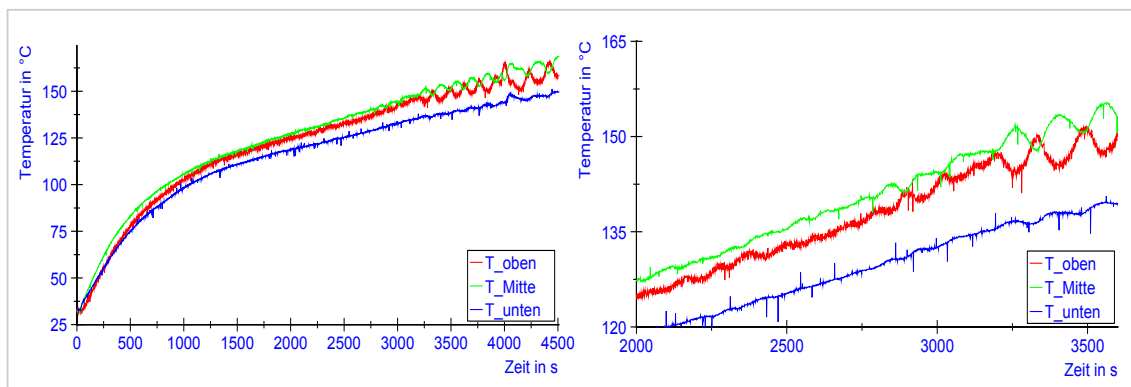
höherfrequenten Anteilen, die mit den Schwingungen bei T_{mitte} korrelieren. Auffällig ist, daß T_{oben} gegenüber T_{mitte} um 180° phasenversetzt schwingt – ein Minimum von T_{mitte} fällt auf ein Maximum von T_{oben} und umgekehrt. Dadurch wird deutlich, daß sich der äußere und mittlere Reibring sehr schnell mit der Lastübertragung abwechseln. Für den NAO kann festgehalten werden, daß die Momentenschwingungen dann einsetzen, wenn der mittlere Reibring einen stationären Zustand oberhalb von 120 bis 140°C eingenommen hat.

Auch der **ECE-kf** zeigt ab dem Bedding ein höheres Temperaturniveau für den mittleren Reibring gegenüber dem äußeren. Die Temperatur- wie auch das Momentensignal zeigen deutliche niederfrequente Schwingungen. Es zeigt sich, daß T_{mitte} mit dem Moment übereinstimmt (in Bezug auf den Kurvenverlauf), T_{oben} jedoch hinterherhinkt (um 180°). Stellt sich bei 100 U/min ein stationärer Reibzustand ein, sind niederfrequente Schwingungen für Temperatur und Moment bei 200 und 300 U/min deutlich erkennbar. Es stellt sich ein Phasenversatz zwischen äußerem und innerem Reibring um nahezu 180° wie beim NAO ein. Auch beim ECE-kf korrelieren das Momenten- und das mittlere Temperatursignal gut. Der das übertragende Moment bestimmende Bereich scheint demnach der mittlere Reibring zu sein. Die Schwingungen (Moment und Temperatur) setzen bei ca. 100 bis 120°C ein und weisen größere Amplitudenschwankungen auf als beim NAO.

Ebenso wie bei den beiden anderen Belägen fällt auch beim **ECE-mk** das mittlere Temperaturniveau höher aus als das des oberen Reibrings. Beide Signale zeigen, wie auch das Momentensignal, (niederfrequente) Schwingungen. Dabei korrelieren T_{mitte} und das Momentensignal, T_{oben} ist um 180° phasenversetzt. Für die Schleppbremsungen bei 100 und 200 U/min stellt sich ein stationärer Reibzustand ein. Erst bei 300 U/min zeigen sich moderate Schwingungen, auch deshalb, weil das Temperaturniveau ausreichend hoch ist, denn erst ab ca. 140 bis 160°C sind beim ECE-mk Temperatur- und Momentenschwankungen zu erkennen.

Zusammenfassend und vergleichend läßt sich festhalten, daß der NAO-Belag generell die niedrigsten Temperaturen und Momente aufweist, der ECE-mk indes die höchsten Werte. In der Nähe zum ECE-mk bewegt sich der ECE-kf, jedoch weist er geringere Werte auf. Trotz der höchsten Temperaturen zeigt der ECE-mk eine sehr gute Temperaturstabilität, die Schwingungen im Momenten- und Temperatursignal setzen erst bei 140 bis 160°C ein und fallen im direkten Vergleich weniger deutlich aus (geringere Amplitudenschwankungen). Am auffälligsten ist in diesem Zusammenhang der ECE-kf, der frühzeitig zu Schwingungen bei Moment und Temperatur neigt.

Auch für die GGS sollen zunächst Grundsatzversuche zur (radialen) Temperaturverteilung analog zur VGS erfolgen. Um einen harmonischen Schwingungszustand zu erhalten, mußte jedoch eine im Vergleich zur VGS höhere Drehzahl gewählt werden.



**Abb. 8.2: radiale Temperaturverteilung für die Paarung GGS – ECE-kf (links),
gezoomter Bereich (rechts)**

Aus Abb. 8.2 wird ersichtlich, daß sich die Temperaturschwingungen erst sehr spät einstellen (im Vergleich zur VGS). Dennoch ist das Verhalten vergleichbar mit dem der VGS was die Amplitudenverhältnisse und Phasenbezüge betrifft. Dies bestätigt die Ergebnisse von Musiol, Dörsch und Kleinlein ([5], [17], [18]) und verdeutlicht, daß das thermische Verhalten beider Scheibenkonzepte vergleichbar ist, auch wenn die Auslöseparameter werkstoffbedingt variieren.

Auf diesen grundsätzlichen Betrachtungen aufbauend sollen nun die drei Belagkonzepte gegen die **Graugußscheibe** gebremst werden. Im Gegensatz zu den Versuchen mit der Vollglasscheibe (VGS) zeigt keine der drei Reibpaarungen auffällige Temperatur bzw. Momentenschwingungen. Die erzielten Temperaturen sind deutlich niedriger als bei der VGS, obgleich die Reibmomente geringfügig höher ausfallen. Eine Ausnahme bildet dabei der ECE-mk: er weist zum Teil deutlich geringere Reibmomente als mit der VGS auf. Auch hier gilt, daß der NAO die niedrigsten Temperaturen und Reibmomente zeigt, obgleich nun beide ECE Beläge ein hohes und annähernd vergleichbares Moment besitzen.

Im weiteren soll der Vergleich der Scheibenkonzepte SGG und GGS erfolgen, um den Einfluß der integrierten Scheibensegmente auf das Reibverhalten zu zeigen. Zwar ist das Temperaturniveau bei der SGG geringfügig niedriger, das Reibmoment ist jedoch vergleichbar. Interessant ist besonders das Verhalten für eine erhöhte Versuchsdrehzahl, welche für den Vergleich beider Scheibenkonzepte zusätzlich berücksichtigt wurde.

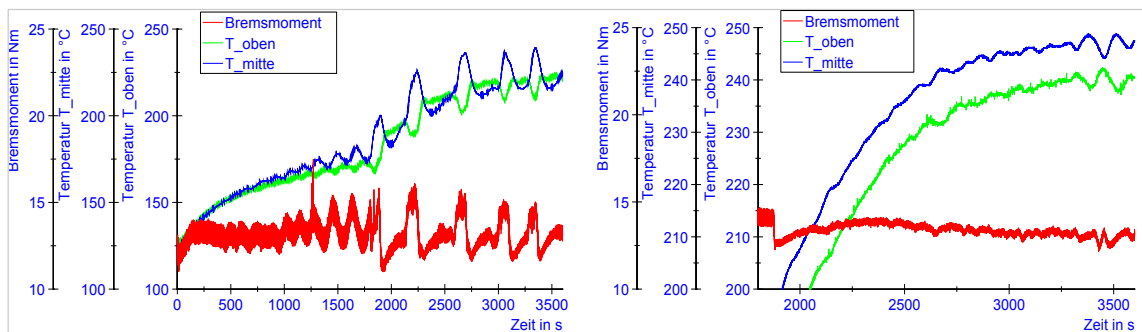


Abb. 8.3: Schleppbremsung SGG – ECE-kf (links) und GGS – ECE-kf (rechts)

Hierbei zeigen sich auch bei der segmentierten Scheibe auffällige Temperaturschwingungen, bei denen die Signale des mittleren und äußeren Thermoelements (T_{oben}) um 180° phasenversetzt schwingen (Abb. 8.3, links). Das Momentensignal korreliert dabei stets besonders gut mit dem mittleren Thermoelement. Ein solches Verhalten ist bereits bei den VGS-Versuchen festgestellt worden.

Im Gegensatz zu den Schleppbremsungen der GGS mit maximal 300 U/min zeigen sich bei erhöhter Drehzahl von 500 U/min nun auch Temperaturschwingungen, die allerdings schwächer ausgeprägt sind (Abb. 8.3, rechts). Eine geänderte Skalierung (Zoom) verdeutlicht diese und zeigt, daß beide Temperatursignale abermals phasenversetzt schwingen.

Bei den Schleppbremsungen zuvor (maximale Drehzahl von 300 U/min) waren die Belastungen offensichtlich noch nicht ausreichend, um die thermischen Verlagerungen hervorzurufen. Neben den thermischen Belastungen und dem applizierten Bremsdruck ist demnach auch die Scheibendrehzahl als Triggermechanismus solcher Schwankungen von Bedeutung.

Als Zwischenfazit zu den Schleppbremsungen kann festgehalten werden, daß der NAO die niedrigsten Temperaturen und Reibmomente aufweist. Die beiden ECE bewegen sich auf ähnlichen Niveaus für Temperatur und Moment. Jedoch zeigt sich hier der Einfluß des Reibpartners Scheibe: der ECE-mk ist in Verbindung mit der VGS tribologisch aggressiver und erreicht höhere Temperaturen und Reibmomente. Temperaturschwingungen und damit verbundene Reibringverlagerungen finden bei allen drei Scheibenkonzepten statt. Die dafür notwendigen Parameter (Triggerung) variieren jedoch. Die Mechanismen indes sind vergleichbar, da die Temperaturen oben (äußerer Reibring) und mittig einen Phasenversatz von 180° aufweisen und das mittlere Temperatursignal in der Regel sehr gut mit dem Reibmomentenverlauf korreliert.

8.1.2 Stopbremsung

Im Rahmen der Charakterisierung von Stopbremsungen für die VGS zeigt der NAO das niedrigste Reibmomentenniveau, der ECE-mk das höchste. Alle Reibpaarungen lassen einen deutlichen DTV-Einfluß erkennen, jedoch kann der NAO dies besser kompensieren. Beide ECE-Beläge offenbaren ein ähnliches Verhalten mit einem deutlichen Aufschwingen des Momentensignals zum Ende der Bremsung hin, während der NAO zudem ein auffälliges Initialverhalten an den Tag legt (Abb. 8.4). Gut zu erkennen

ist die Reibmomentenüberhöhung, welche auch als „Initial Bite“ bekannt ist. Jene wurde im Rahmen der in-situ Analysen bereits betrachtet.

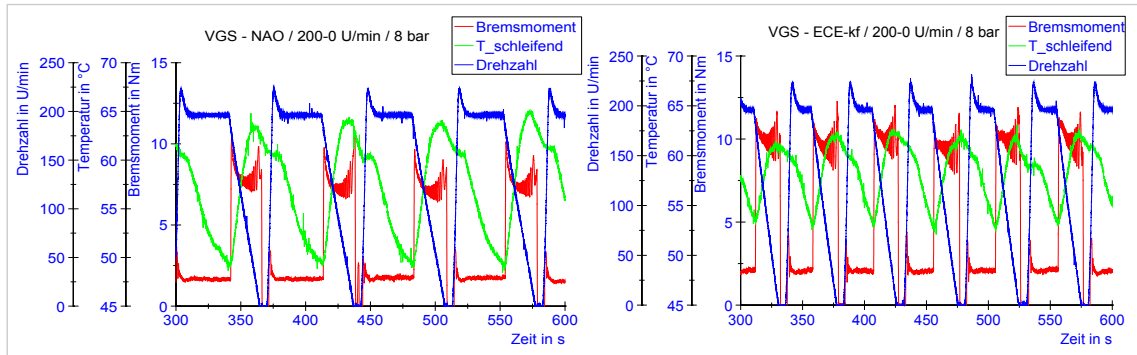


Abb. 8.4: Stoppbremmung von VGS – NAO (links) und VGS – ECE-kf (rechts)

Auch bei den Versuchen mit der GGS zeigen beide ECE-Beläge deutliche DTV-Einflüsse, der NAO kann dies erneut besser kompensieren. Nur am Ende der Bremsung schwingt sich das Momentensignal auf, eine initiale Momentenüberhöhung (Initial Bite) wie bei den Versuchen mit der VGS kann indes nicht erkannt werden. Für alle Beläge gilt, daß das Moment mit fallender Relativgeschwindigkeit steigt.

Die Betrachtung der Reibmomente offenbart, daß der ECE-mk erneut mit der GGS niedrigere Werte erzielt als mit der VGS, wie dies bereits bei den Schleppbremsungen der Fall war.

Als Zwischenfazit kann festgestellt werden, daß die Instop-Bremsungen die Aussagen der Schleppbremsungen prinzipiell bestätigen, was die erzielten Reibmomentenniveaus der einzelnen Beläge und Scheibenkonzepte betrifft. Mit der VGS ist der ECE-mk der tribologisch aggressivste Belag, der NAO weist das niedrigste Reibmoment und Temperaturniveau auf. Bei Nutzung der GGS steigen die Momente an, außer beim ECE-mk, dessen Moment fällt.

Als Fazit der tribologischen Charakterisierungen sind die auftretenden Effekte wie z.B. Thermoelastische Instabilitäten für die verschiedenen Scheibenkonzepte, auch wenn die für die Triggerung erforderlichen Betriebsparameter variieren, durchaus vergleichbar. Das jeweilige Scheibenkonzept kann jedoch auch im Zusammenspiel mit dem Belag zu

deutlichen Unterschieden führen, wie der ECE-mk in Verbindung mit der VGS (aggressives tribologische Verhalten) und der GGS (niedrigstes Reibmoment im Direktvergleich der drei Beläge) verdeutlicht. Die Belagkonzepte selbst zeigen Unterschiede hinsichtlich des thermischen Verhaltens, was die Temperaturschwingungen betrifft. Für alle Beläge jedoch gilt, daß der mittlere Reibring die höchsten Temperaturen zeigt und in seinem qualitativen Verlauf sehr gut mit dem Reibmomentensignal korreliert.

8.1.3 Vergleich mit einer Referenzbremse

Für die Vergleich- und Übertragbarkeit in Bezug auf eine konventionelle Referenzbremse (mit den gleichen Reibbelägen wie bei den in-situ Versuchen) wird zunächst die **globale Zusammenfassung** der Ergebnisse einer AK Masterprüfung ([92]) genutzt. Der ECE-kf weist den größten Reibwert (nomineller Reibwert = 0,54) auf, was auch mit der hohen Konzentration an Reibkraftverstärkern leicht erklärt werden kann. Ebenso besitzt der NAO einen zunächst unerwartet hohen Reibwert (nomineller Reibwert = 0,4). Unter Zuhilfenahme der Betrachtung seiner chemischen Zusammensetzung (Kapitel 8.2) wird dies mit dem erhöhten Zirkoniumanteil begründet. Als Zirkon besitzt es eine hohe Mohshärte und wird gezielt zur Einstellung bzw. Erhöhung des Reibwertes berücksichtigt. Im direkten Vergleich weist der ECE-mk den niedrigsten Reibwert (nomineller Reibwert = 0,36) auf, was durchaus mit dem Kupferanteil begründet werden kann. Gemäß Österle wird dem Kupfer eine Wirkung wie Graphit attestiert, welches wie ein Festschmierstoff wirkt und den Reibwert verringert. [31]

In Bezug auf das **Verschleißverhalten** ist der ECE-kf der aggressivste Belag mit dem höchsten Scheibenverschleiß. Während der Belagverschleiß der beiden ECE-Beläge leicht über dem NAO liegt, ist dieser der verschleißärmste Reibpartner: er ist am wenigsten aggressiv zur Scheibe und zu sich selbst. Dabei ist jedoch festzustellen, daß bei extremen thermischen Belastungen (wie dem Fading) sich diese Aussagen umkehren

können. Durch ablativen Verschleiß steigt dann das Verschleißvolumen des NAO-Belages deutlich (s.a. Abb. 13.57). Neben den absoluten Verschleißangaben sollen auch die sich einstellenden **Verschleißbilder** vorgestellt werden. Für alle drei Belagvarianten stellt sich ein deutlicher Schrägverschleiß ein, bei dem die finger- und kolbenseitigen Beläge unterschiedliches Verhalten zeigen. Ist fingerseitig ein erhöhter Verschleiß im Auslauf zu konstatieren, tritt kolbenseitig ein erhöhter Verschleiß im Einlauf auf. Zudem ist festzuhalten, daß der innere Reibradius jeweils den geringsten Verschleiß aufweist.

Im weiteren soll kurz das Einlaufverhalten (**Bedding**) der Reibpaarungen vorgestellt werden. Auffällig für beide ECE-Beläge, besonders jedoch für den ECE-kf, sind die deutlichen Reibwertanstiege für die ersten Bremsungen (Abb. 13.51). Für den NAO zeigt sich vielmehr ein langsamerer und kontinuierlicherer Anstieg des Reibwerts über die beiden Zyklen.

Da in-situ Aussagen zum Partikel- und Verschleißverhalten für diese Bremse nicht möglich sind, eine Aussage zum Verhalten während der Bremsung wünschenswert scheint (auch deshalb, um möglich Analogien zu den Versuchen aus Kapitel 7 aufzuzeigen), wird sich der online Erfassung der Partikelmassenemission bedient, die kurz vorgestellt werden soll. Es wird die Partikelmassenemission als Hilfsgröße genutzt, um zeitaufgelöste Informationen über die Aerosolkonzentration (in mg/m^3), die als Folge der Vorgänge in der Reibzone zu sehen ist, zu erhalten. Die Umsetzung erfolgt über eine Meßsonde zur Erfassung der Partikelmassenkonzentration in Form des Systems Dust Track II – Aerosol Monitor Model 8530, einem Einkanal-Photometer der Firma TSI. Im konkreten Fall wird ein PM_{10} Einlaßimpaktor genutzt, der auslaufseitig in der Nähe der Bremse fixiert wird, was in Abb. 13.52 zu erkennen ist. Damit werden die Partikel erfaßt, die einen aerodynamischen Durchmesser von maximal 10 Mikrometern aufweisen, wobei die untere Grenze 100 nm beträgt. Da das System über eine isokinetische Sonde verfügt, wird der Partikelstrom angesaugt und gelangt so in das Meßgerät. Auch wenn aktuell Systeme bekannt sind, die

neben den Partikelmassen auch deren Anzahl ausgeben sowie deutlich kleinere Partikel erfassen können, ist zu bemerken, daß das Dust Track II bewußt verwendet wurde, da es kompakt, mobil und flexibel einzusetzen ist

Die erfaßten Partikelemissionen verhalten sich beim ECE-kf wie es die Reibwertverläufe erwarten lassen: von Beginn an treten hohe Verschleißraten auf, die im weiteren Verlauf abnehmen, da sich die schützenden Reibschichten ausgeprägt haben (Abb. 13.53). Bei ECE-mk und NAO indes zeigen sich bei den ersten Bremsungen hingegen kaum nennenswerte Partikelemissionen. Für den ECE-mk verläuft diese dann im weiteren auf niedrigem Niveau und nahezu konstant, während beim NAO eine leichte Zunahme mit einem anschließend nahezu konstantem Verlauf festzustellen ist. Die Emissionsniveaus sind für den ECE-kf und den NAO am Ende des Beddings fast gleich, der ECE-mk liegt deutlich darunter. Dies läßt eine gute Korrelation mit den Reibwerten vermuten, die beim ECE-mk am niedrigsten ausgefallen sind und für ECE-kf und NAO auf annähernd gleichem Niveau liegen. Tatsächlich lassen sich Korrelationen zwischen den Reibwerten und den Partikelemissionen erkennen, obgleich Ausreißer und Abweichungen auftreten können (Abb. 13.54).

Nachdem in Kapitel 7.1.1 bereits gezeigt wurde, daß der NAO-Belag Momentenüberhöhungen (Initial Bite) zu Beginn einer Bremsung aufweisen kann und diese im Zusammenhang zur initialen Patchdynamik stehen, soll an dieser Stelle das Momentenverhalten für den grünen und eingelaufenen Zustand gegenübergestellt werden (Abb. 13.55). Der NAO zeigt im Grünzustand keine Auffälligkeiten im Momentensignal, es verläuft annähernd konstant. Im eingelaufenen Zustand indes, wenn sich die Reibschicht bzw. Patches etabliert haben, sind Momentenüberhöhungen zu Beginn der Bremsung feststellbar. Daraus und aus den zuvor gewonnenen Erkenntnissen wird geschlußfolgert, daß Initial Bites nicht nur eine bestimmte Patchinitialisierungsdynamik benötigen, sondern überhaupt einer ausgeprägten Reibschicht bedürfen. Ist diese in Form von Patches

nicht vorhanden (grüner oder überlasteter Zustand), treten keine Momentenüberhöhungen zu Beginn der Bremsung auf.

Die Analyse der **Geschwindigkeits- / Druckreihen** (Zyklus 4) ist für Aussagen bezüglich des Leistungsverhaltens der eingelaufenen Reibpaarung gut geeignet (Abb. 13.56). Auffällig ist das höhere Temperaturniveau (der Bremsscheibe) des NAO. Referenzmessungen im Belag haben ebendort geringere Temperaturen (im Vergleich zu den beiden übrigen Belägen) gezeigt. Da der NAO ein anderes (geringeres) Wärmeleitvermögen als die beiden ECE-Beläge an den Tag legt, wird geschlußfolgert, daß die Scheibe einen höheren Anteil an der in Wärme umgesetzten Energie trägt und demnach höhere Temperaturen aufweist. In den beiden Zyklen mit der höchsten Reibleistung lassen sich, obgleich nur schwach ausgeprägt, Temperaturschwankungen erkennen, am deutlichsten beim ECE-kf. Diese sind Ausdruck von Reibzonenverlagerungen, so daß sich die Reibkraftübertragung auf verschiedene Reibradien verlagert. Solche Verlagerungen gehen einher mit einer gestiegenen Partikelemission. Nach erfolgter Verlagerung verringert sich das emittierte Partikelvolumen wieder, was ebenfalls gut in den Fadingblöcken (Abb. 13.57) beim ECE-kf (ab Bremsung 4 in Fadingblock 1), ECE-mk (ab Bremsung 5 in Fadingblock 2) sowie dem NAO (ab Bremsung 6 in Fadingblock 1) erkannt werden kann.

Das Reibniveau zeigt sich geschwindigkeitsabhängig und fällt mit steigender Zykluszahl, die gleichbedeutend mit einem höheren Geschwindigkeitsniveau ist. Auch für den Zyklus 4 bestätigen sich die Reibwertverhältnisse für den ECE-kf als Belag mit dem höchsten Niveau, gefolgt vom NAO und dem ECE-mk, der die geringsten Reibwerte zeigt.

Bezüglich der Partikelemissionen ist zu erkennen, daß diese mit der Reibleistung korreliert: eine gestiegene Reibleistung hat eine erhöhte Partikelemission zur Folge (s.a. Abb. 13.59). Auffällig ist demnach, daß beide ECE-Beläge ähnliche Partikelemissionen in typischen Belastungszyklen und mit eingelaufenen Reibpaarungen zeigen. Der NAO indes zeigt eher eine lineare Tendenz und läßt damit geänderte Partikel-

und Patchmechanismen erwarten, was in Kapitel 7 bereits bestätigt wurde. Auch kann festgehalten werden, daß unter Bedingungen, die nicht extreme thermische Belastungen darstellen, die Menge an emittierten Partikeln für beide ECE-Beläge annähernd vergleichbar ist und deutlich über der des NAO liegt (im Falle hoher Reibleistungen).

8.2 REM / EDX – Untersuchungen

Das Ziel dieser Untersuchungen ist die Charakterisierung der Oberflächen der Reibpartner hinsichtlich ihrer physikalischen (REM) und ihrer chemischen Gestalt (EDX). Damit soll es möglich sein, daß tribologische Verhalten besser zu verstehen und begründen zu können. Obgleich die Methoden für beide Reibpartner gleich sind, werden sie dennoch auf die Besonderheiten von Reibbelag und Bremsscheibe angepaßt

8.2.1 Grüne Reibpartner

In einem ersten Schritt sind die Borosilikatglasscheiben im grünen Zustand zu untersuchen.

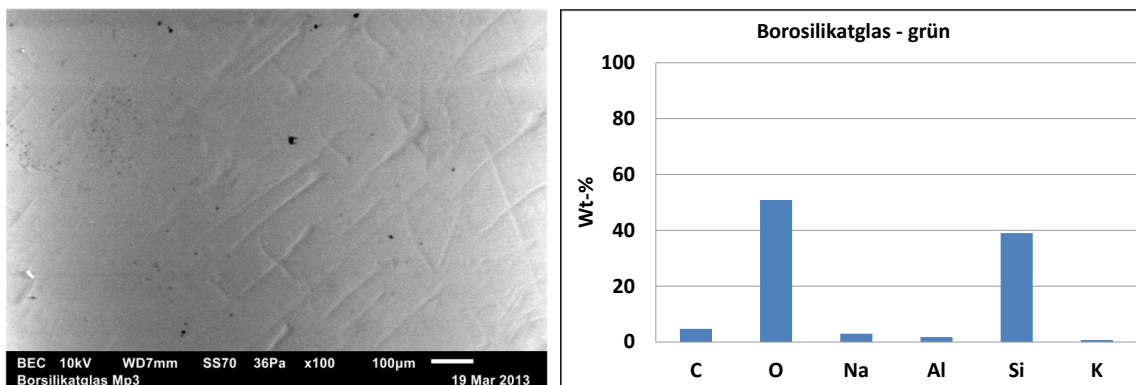


Abb. 8.5: REM-Aufnahme einer unbehandelten Borosilikatscheibe (links), EDX-Analysen einer VGS (grün), Mittelung von 3 Meßpunkten bei 100x (rechts)

Wie in Abb. 8.5, links, gut zu erkennen ist, zeigt sich die Oberfläche von sehr feinen Furchen durchzogen. Relativ kleine, schwarze Einfärbungen können ebenfalls ausgemacht werden, die dem Kohlenstoff zugeordnet werden können und Verunreinigungen darstellen. Die chemische Analyse liefert die in Abb. 8.5, rechts, dargestellten Ergebnisse, wobei zu bemerken ist, daß mit der genutzten Meßtechnik das Element Bor nicht erfaßt wird.

Der Kohlenstoffanteil rührt von geringfügigen Verunreinigungen (Staubpartikel an der Oberfläche) her und ist nicht als Bestandteil des Prüflings zu sehen. Daß das Material als homogen bezeichnet werden kann, sollen die Ergebnisse eines Linescans verdeutlichen, die in Abb. 13.60 zu finden sind.

Die genutzten Graugußscheiben (GGS) weisen im Neuzustand eine Korrosionsschutzbeschichtung auf. Diese verfälscht bzw. beeinflusst das initiale Reibverhalten, weshalb die Schutzschicht vor den Reibversuchen mechanisch entfernt wurde. Dieser Zustand der GGS, der demzufolge den grünen Zustand darstellt, wird im folgenden näher untersucht. An einem Scheibensegment werden drei Meßpositionen ausgewählt (verteilt in radialer Richtung, gleiches tangenciales Segment), um REM-Aufnahmen und EDX-Analysen bei 100-facher Vergrößerung durchzuführen.

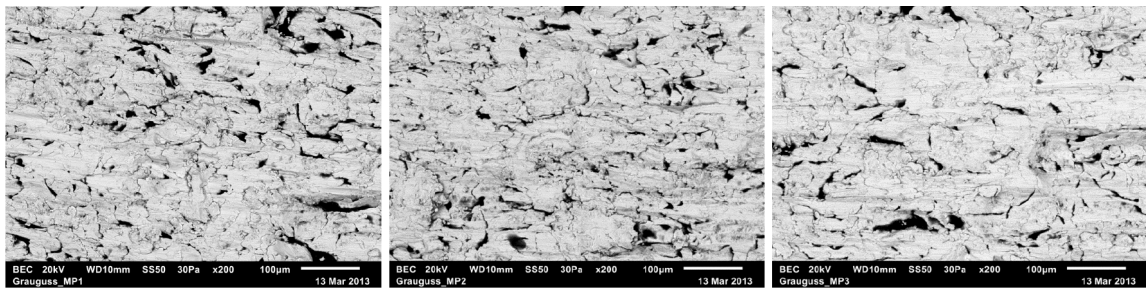


Abb. 8.6: REM-Aufnahmen einer GGS (grün) an 3 Meßpunkten bei 100x

Die REM-Aufnahmen verdeutlichen, daß die Oberflächen für die einzelnen Meßpunkte keine Unterschiede im Gefüge aufweisen. Es kann von plattenartigen Strukturen gesprochen werden, deutliche Schleifspuren sind nicht auszumachen. Die Zuordnung der chemischen Elemente ist zudem eindeutig: dunkel bzw. schwarz eingefärbte Bereiche stellen die Kohlenstoffanteile dar, während die hellgrauen Bereiche im wesentlichen dem Eisen zugeordnet werden können.

Die Untersuchungen der Reibbeläge, welche komplett betrachtet werden, erfolgten unter Nutzung einer Meßmaske, so daß 9 Meßpunkte vermessen werden können (Abb. 13.9, rechts). Dies soll es zum einen erlauben, Positionen mit einer möglichst hohen Wiederholgenauigkeit anzufahren,

und zum anderen eine Art Rasterung der Belagoberfläche vorzunehmen, was eine Klassifizierung in radialer und tangentialer Ausdehnung erlaubt. Bisherige Arbeiten betrachten zumeist einzelne, oft willkürlich gewählte Bereiche. Die vorliegende Arbeit möchte nun etwaige Unterschiede der Reibzone aufzeigen, aber auch dezidierte Aussagen und Vergleiche zu den in-situ Untersuchungen bereitstellen. Die dort vorgenommenen Aufnahmen entsprechen in ihren Positionen den Meßstellen der REM / EDX-Analysen. Diese werden mit unterschiedlichen Vergrößerungen vorgenommen: 30x, 100x und 200x. Somit ergibt sich ein besseres Bild pro Meßpunkt und auch eine Aussage, inwiefern geringe Vergrößerungen repräsentativ sein können oder nicht (Abb. 8.7).



Abb. 8.7: REM-Aufnahme eines ECE-kf Belages mit 30-, 100- und 200-facher Vergrößerung

Das Beispiel verdeutlicht sehr gut, daß die EDX-Analyse bei 200x deutlich von der Eisenfaser (markierter Bereich) beeinflusst wird, so daß zumindest für die chemischen Analysen geringere Auflösungen empfohlen werden, um ein möglichst repräsentatives Bild zu erlangen.

Zunächst sollen die drei genutzten Reibbeläge im grünen Zustand untersucht werden. Der **NAO** zeigt eine sehr homogene Oberflächengestalt (Abb. 13.62, beispielhaft gezeigt anhand von MP 1). Er weist keine großen Kontrastunterschiede auf, so daß eine eindeutige Differenzierung der Elemente anhand der REM-Aufnahmen schwer fällt und eine Zuordnung im REM-Bild nur dank EDX-Maps möglich ist. Auffällig bei ihm sind die deutlich zu erkennenden Kohlenstoffplateaus, die als kreisförmig charakterisiert

werden können. Daneben sind besonders agglomerierte Bereiche anderer Elemente auffällig (Abb. 8.8, links oben).

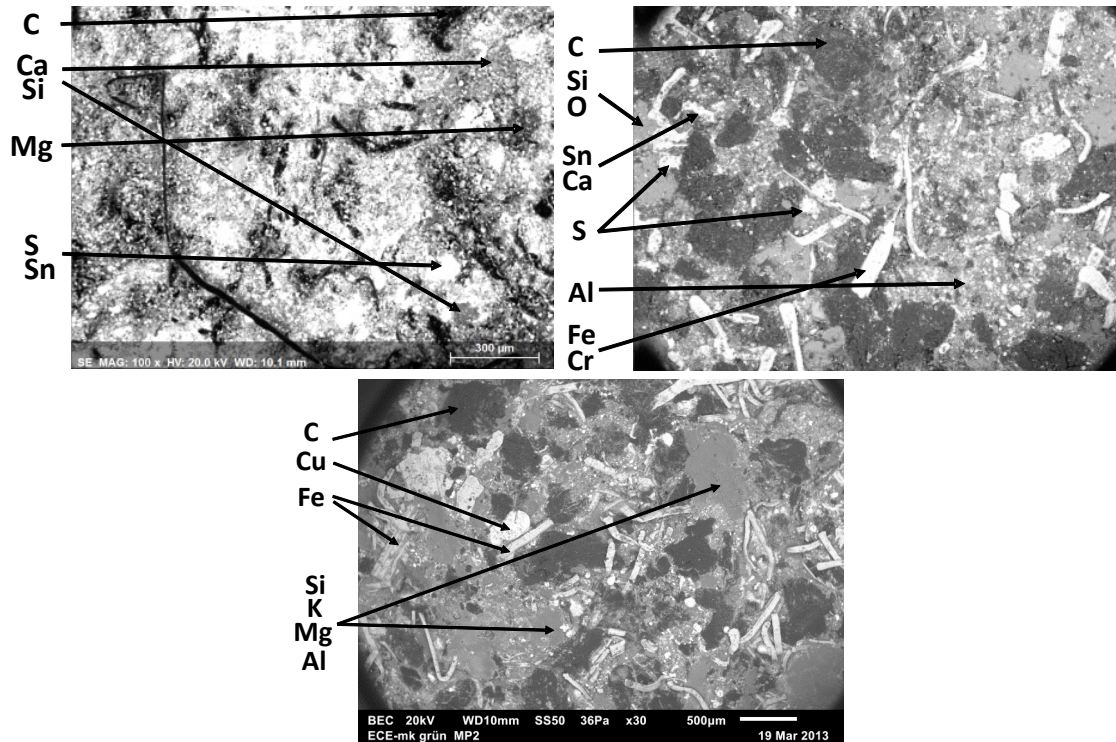


Abb. 8.8: REM-Aufnahmen von NAO (links oben), ECE-kf (rechts oben) und ECE-mk (Mitte unten)

Die genaue Betrachtung der Elementverteilungen (bei 30-facher Vergrößerung) verdeutlicht nur sehr geringe Streuungen über den kompletten Belag (Abb. 13.63). Der Eisenanteil fällt sehr gering aus, während Titan (in Verbindung mit Kalium als Kaliumtitanat) in sehr deutlichen Mengen vorhanden ist, um die Wärmeleitung zu verbessern und auch den Reibwert zu erhöhen. Hierfür dient auch das Zirkonium, welches durch seine hohe Härte (besonders wenn es als Zirkon auftritt) ebenfalls die Verschleißfestigkeit erhöht. Gleiches gilt für das vorhandene Silizium (z.B. als Silikat- oder Glasfaser), welches ebenfalls, wie auch das Magnesium (wahrscheinlich als Magnesiumoxid), als Reibstoff dient. Letzteres stabilisiert den Reibwert, da es einen hohen Schmelzpunkt besitzt. Auch Barium (meist als Baryt (BaSO_4) vorkommend) und Kalzium

(als Kalziumkarbonat (CaCO_3)) dienen der Temperaturstabilität bzw. erhöhen diese.

Die Betrachtung der Elementverteilungen bei 200-facher Vergrößerung verdeutlicht erwartungsgemäß eine höhere Streubreite der Elemente für die einzelnen Meßpunkte als bei 30-facher Vergrößerung. Dennoch ist beim NAO festzuhalten, daß er über eine recht homogene Verteilung verfügt, bei der der Kohlenstoff die größten Streuungen aufweist.

Der **ECE-kf** besitzt deutlich auszumachende Eisenfasern, die als sehr lang charakterisiert werden können. Durch den Preßvorgang ist gut zu erkennen, daß sie niedergedrückt wurden und daher weniger erhaben sind (durch den Reibvorgang ändert sich dies, so daß die Eisenspäne als Primärpatch wirken). Die Kohlenstoffbereiche sind schieferartig ausgeprägt und lassen sich aufgrund des guten Kontrastes leicht differenzieren. Viele Mikropartikel finden sich auf der kompletten Oberfläche verteilt. Aufgrund von EDX-Mappings können die wichtigsten Elemente mit den größten Häufigkeiten in den REM-Aufnahmen zugeordnet werden (Abb. 8.8, rechts oben). Das Silizium findet sich agglomeriert wieder. Da auch Sauerstoff in den entsprechenden Bereichen detektiert wurde, kann man davon ausgehen, daß Siliziumdioxid (SiO_2) vorliegt. Neben den Eisenspänen findet sich auch Chrom in spanförmiger Gestalt, interessanterweise in genau den gleichen Regionen wie die Eisenspäne. Denkbar ist daher, daß spezielle Eisenchromlegierungen zu Zwecken des Korrosionsschutzes Verwendung finden.

Die Eisenfasern beim **ECE-mk** sind im Vergleich zum ECE-kf kürzer, jedoch zahlreicher vorhanden. Auch diese wurden durch den Preßvorgang bzw. Preßstempel niedergedrückt und sind nun weniger erhaben. Auffällig sind Mikropartikel, die über die komplette Oberfläche verteilt sind und an größeren Strukturen anhaften. Der Kohlenstoff kann als schieferförmig beschrieben werden. Mittels EDX-Mapping sind die einzelnen Elemente in den REM-Aufnahmen zuordenbar (Abb. 8.8, Mitte unten). Das Eisen ist dabei klar als Span zu erkennen, aber auch größere, flächige Strukturen

existieren. Der Kohlenstoff kann anhand schwarzer (sehr dunkler) flächenhafter Strukturen erkannt werden. Als Agglomerat bzw. flächige Struktur tritt Kupfer mit einem hellen Kontrast in Erscheinung.

Nach der Vorstellung der einzelnen Beläge erfolgt eine Gegenüberstellung. Hierzu wird sich zunächst der Darstellung der relativen Streuungen der Elementverteilungen bedient. Wie zu erwarten ist, zeigen sich mit höherer Vergrößerung für alle Beläge auch größere Streuungen bzw. inhomogenere Verteilungen (Abb. 8.9). Daher wird für die weiteren Analysen die 30-fache Vergrößerung als die aussagekräftigste verwendet (ergänzende Analysen sind dem Anhang 13.4.2 zu entnehmen).

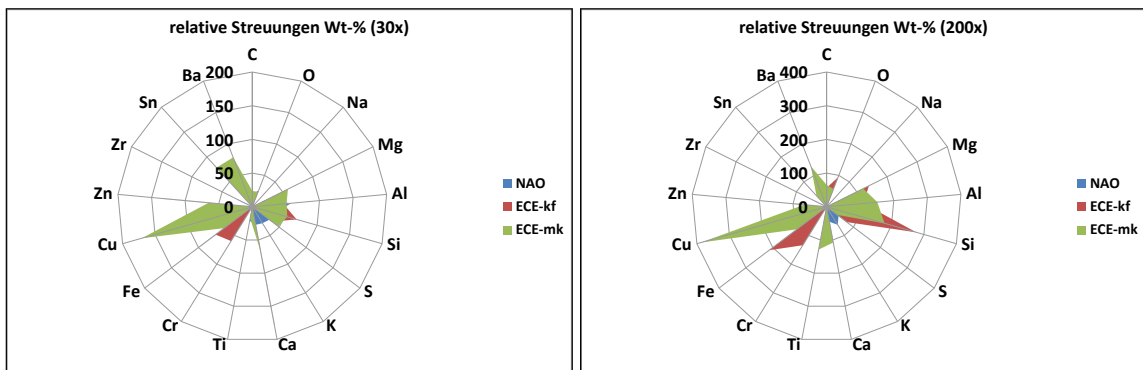


Abb. 8.9: Streuung (mittelwertbezogen) von NAO, ECE-kf und ECE-mk bei 30x (links) und 200x (rechts)

Der Direktvergleich zeigt zudem, daß der NAO der deutlich am homogensten aufgebaute Reibbelag ist. Die größten Streuungen weist der ECE-mk, ganz besonders aufgrund des Kupfers. Dies ist insofern interessant, als daß dieses Verhalten mit der Patch- und Partikelbildung bei den in-situ Analysen korreliert. Damit zeigt sich, daß solche Inhomogenitäten eine Rückwirkung auf die Dynamik der Patchbildung und der Partikelströme haben.

Vergleicht man die Elementverteilungen der Beläge direkt miteinander, so fällt auf, daß der ECE-kf Chrom und Zinn sowie einen geringeren Eisenanteil gegenüber dem ECE-mk besitzt. Dieser verzichtet auf die beiden zuerst genannten Elemente und setzt auf einen höheren Eisenanteil sowie auf Kupfer. Der NAO-Belag weist einen geringeren Kohlenstoffanteil auf als die

beiden ECE-Beläge und besitzt als Unterschied bemerkenswerte Titan-, Zirkon- und Bariumanteile, aber auch Kalium und Calcium sind deutlich vorhanden.

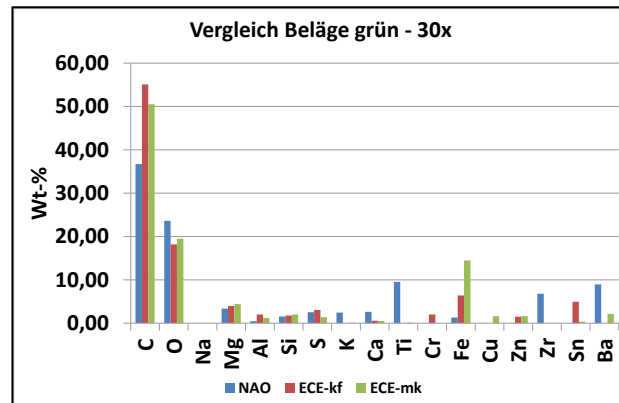


Abb. 8.10: Vergleich der Elementverteilungen für grüne Reibbeläge (Mittelwerte von jeweils 9 Meßpunkten, 30x)

Auch wenn der NAO in den vorangegangenen Analysen zumeist den niedrigsten Reibwert aufwies, können das Titan und Zirkon den Mangel an Eisenspänen recht gut kompensieren und sorgen für einen relativ hohen Reibwert. Das Zinn beim ECE-mk indes kann für den recht niedrigen Reibwert verantwortlich zeichnen, da es, zumal in Kombination mit Schwefel als Zinnsulfid, als fester Schmierstoff zur Verminderung des adhäsiven Verschleißes fungieren kann.

8.2.2 Glasversuche

In Anschluß an die grünen Reibpartner sind die gelaufenen zu charakterisieren. Zunächst werden die Glasscheiben der in-situ Versuche (**VGS**) analysiert.

Es wurde je ein Meßpunkt innen, mittig und außen auf dem Reibradius bzw. Reibring gewählt. Beispielhaft werden die Ergebnisse für eine VGS vorgestellt, die gegen einen ECE-kf-Belag gebremst wurde.

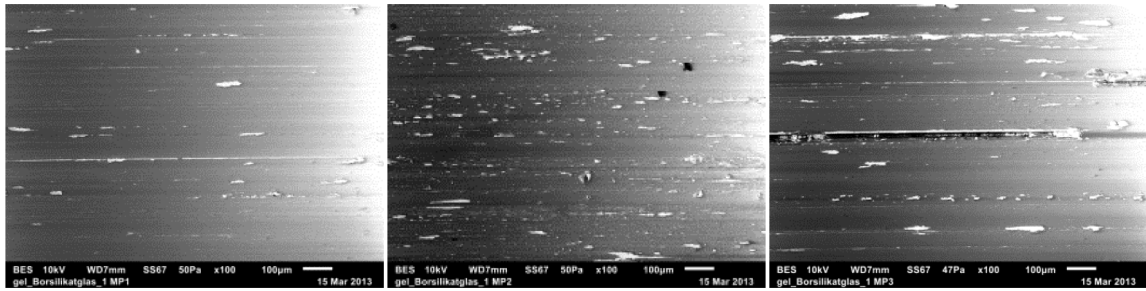


Abb. 8.11: REM-Aufnahmen einer VGS (gelaufen, gegen ECE-kf), für 3 Meßpunkte bei 100x

Zu erkennen sind in Abb. 8.11 deutliche Schleifspuren, die sehr schmal ausfallen können, aber auch breitere, die denen auf den Belägen entsprechen. Ebenso zeigen sich längliche Krater (jeweils heller Kontrast), die mittels Linescan näher charakterisiert werden können (Abb. 8.12).

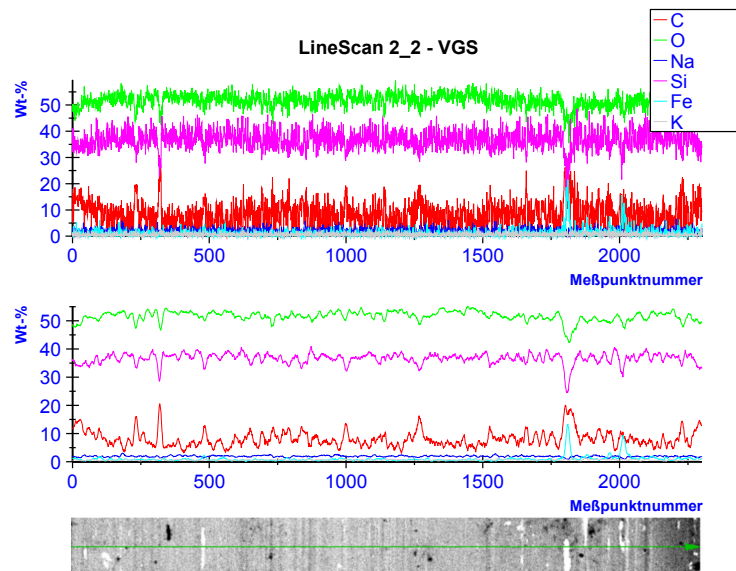


Abb. 8.12: Linescan einer gelaufenen VGS (gegen ECE-kf gebremst)

Mit diesen Analysen kann bestätigt werden, daß ein Materialtransfer vom Reibbelag zum Reibring erfolgt. Die länglichen Krater (heller Kontrast) verdeutlichen, daß der Eisen-, aber auch der Kohlenstoffanteil an diesen Stellen der VGS deutlich erhöht ist. Interessanterweise finden sich keine weiteren Abriebspuren anderer Elemente des Reibbelages, was verdeutlicht, daß das Eisen der tribologisch aggressivste Bestandteil ist.

Weitere Analysen betreffen die segmentierten Graugußscheiben (SGG) im eingelaufenen Zustand. Hierzu wurden die entsprechenden Segmente präpariert, um mittels REM /EDX untersucht zu werden. Um einen möglichst guten Überblick auch der Übergangsbereiche der beiden Materialien zu erhalten, wurden Linescans durchgeführt.

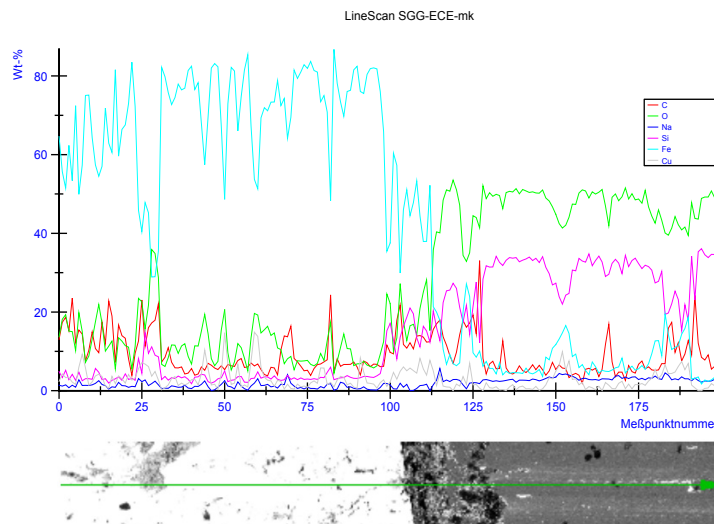


Abb. 8.13: Linescan einer gelaufenen SGG (gegen ECE-mk gebremst)

Deutlich lassen sich am Beispiel der **SGG** mit dem **ECE-mk** die beiden unterschiedlichen Reibpartner sowie der Übergangsbereich erkennen und unterscheiden (Abb. 8.13). Letzterer verdeutlicht sehr gut, daß sich in ihm Abriebprodukte beider Materialien sowie des Reibbelages anlagern, namentlich Silizium, Kohlenstoff, Eisen, Kupfer und Sauerstoff. Speziell das Kupfer ist interessant, da es ausschließlich vom Belag stammen kann und sehr gleichmäßig über den kompletten Reibring verteilt ist. Demnach sind die Mechanismen des Materialtransfers bzw. der Ausprägung einer Reibschicht für Grauguß- und Borosilikatglasscheiben vergleichbar. Dies bestätigt sich auch für die Reibpaarung **SGG-NAO**, so daß es bezüglich der Übertragungsmechanismen keine Unterschiede zwischen NAO- und ECE-Belägen gibt.

Hinsichtlich der Reibbelagcharakterisierung der in-situ Versuche werden ebenfalls eingelaufene Prüflinge untersucht. Dabei zeigt der **NAO** eine sehr

deutliche Patchausprägung bzw. sehr viel verdichtetes Abriebmaterial. Da die Analysetechnik sensibel auf die Abriebpartikel reagieren kann, wurden die Prüflinge vorsichtig von losen Ablagerungen befreit. Zuvor wurden jedoch Staubproben entnommen (Abb. 8.14, links).



Abb. 8.14: NAO Belag nach Schleppprüfung (links), Hot Spot Bildung während einer Schleppbremsung (rechts)

Bei der ex-situ Betrachtung fallen besonders die drei unterschiedlichen Reibringe auf (zwei helle, ein dunkler): der dunkle weist stark verfestigte Partikel auf, während die hellen Schichten dünner sind und nur schwache Bindungskräfte besitzen (leichte Berührung löst die Reibschichten bereits ab). Eine solche Einfärbung wird auch bei den AK Master Versuchen festgestellt und verdeutlicht, daß der Belag nicht nur moderat belastet wird. Da der mittlere Reibradius stärker belastet ist, besser trägt und dazu neigen kann, Hitzeflecken (Hot Spots) aufzuweisen, verdeutlicht auch Abb. 8.14, rechts. Diese Thermoelastischen Instabilitäten wurden in Kapitel 7.5.3 bereits näher untersucht und vorgestellt.

Aus Abb. 8.15 ist ein direkter Vergleich der Reibbelagoberflächen für eine 30-fache Vergrößerung und jeweils einen (gleichen) Meßpunkt dargestellt. Sehr gut zu erkennen ist, daß der NAO-Belag eine homogenere, weniger zerklüftete Oberflächengestalt als die beiden ECE-Beläge aufweist. Auffällig sind die im Reibkuchen integrierten Kohlenstoffpatches. Neben den Kohlenstoffbereichen, die sogar größere Flächen bedecken können als beim NAO, sind beide ECE-Beläge geprägt von Eisenspänen, die jedoch beim ECE-kf länger und schmaler als beim ECE-mk ausfallen.

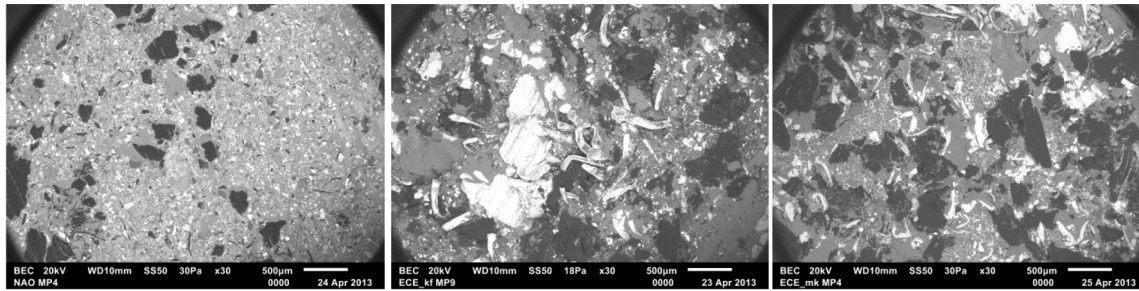


Abb. 8.15: REM-Aufnahmen nach Bedding (gegen VGS gebremst) und Abblasen von NAO (links), ECE-kf (Mitte) sowie ECE-mk (rechts)

Sehr gut zu erkennen ist, daß der NAO-Belag eine homogenere, weniger zerklüftete Oberflächengestalt als die beiden ECE-Beläge aufweist. Auffällig sind die im Reibkuchen integrierten Kohlenstoffpatches. Neben den Kohlenstoffbereichen, die sogar größere Flächen bedecken können als beim NAO, sind beide ECE-Beläge geprägt von Eisenspänen, die jedoch beim ECE-kf länger und schmaler als beim ECE-mk ausfallen.

Die Oberflächengestalt des NAO weist Abrieb- und Verschleißspuren von den Reibversuchen auf (Abb. 13.71), so daß sich insbesondere bei 200-facher Vergrößerung Verschleißriefen z.B. auf den Kohlenstoffpatches zeigen. Ebenso sind feine und anhaftende Abriebpartikel zu erkennen. Das Verschleißbild wird als moderat eingestuft, was auch durch das EDX-Mapping bestätigt wird. Die einzelnen chemischen Elemente weisen in ihrer Gestaltanordnung (agglomeriert, fein und homogen verteilt etc.) nicht allzu große Unterschiede zum grünen Belag auf. Das Silizium besitzt erwartungsgemäß eine größere Präsenz, ohne jedoch dominant auf der Belagoberfläche vorzukommen. Aus der orts aufgelösten chemischen Elementanalyse (Abb. 13.72) ist keine erhöhte Kohlenstoffkonzentration am mittleren Reibring erkennbar, ebenso scheint keine einheitliche Tendenz für den Kohlenstoff zu bestehen. Jedoch sind Korrelationen der Verhältnisse zwischen Sauerstoff und Silizium (was auf das Vorhandensein von SiO_2 schließen läßt) zu erkennen. Am mittleren Reibring zeigen sich leicht erhöhte Anteile von Zirkonium und Titan. Dies bestätigt die Temperaturstabilität sowie das hohe Reibmoment und verdeutlicht die

Bedeutung des mittleren Reibrings für die Lastübertragung. In Abb. 8.16, links, sind die Analysen (Mittelwerte) für die gelaufene Reibmatrix, den separat untersuchten Staub sowie zum direkten Vergleich die grüne Matrix gegenübergestellt. Der Staub verdeutlicht den Materialtransfer sehr gut, obwohl auch die behandelte, gelaufene Belagoberfläche die Tendenzen erkennen läßt. Wichtig ist, daß der Staub hohe Anteile von Silizium und Sauerstoff besitzt, so daß hierbei von SiO_2 als Abriebprodukt ausgegangen werden kann. Damit zeigt sich, daß ein Materialübertrag von der Scheibe auf den Belag stattfindet, so daß schließlich von einem wechselseitigen Materialaustausch gesprochen werden kann, da die Analysen der VGS bereits Elemente des Belages auf ihr nachgewiesen haben.

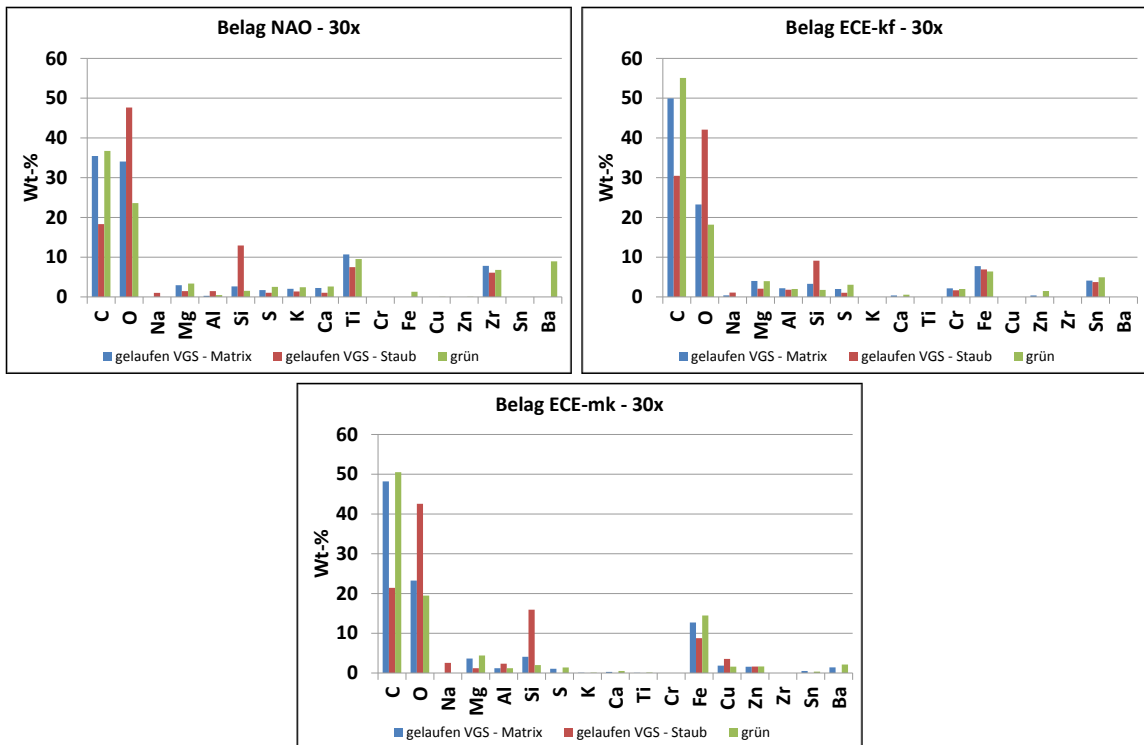


Abb. 8.16: Vergleich der chemischen Elementanalysen für NAO (links), ECE-kf (rechts) sowie ECE-mk (unten)

Auch beim **ECE-kf** prägen sich in Kombination mit der **VGS** verschiedene Reibringe aus, der mittlere trägt die wohl höchste Last und zeigt deutliche Hitzeflecken, was in Kapitel 7.5.3 bereits näher betrachtet wurde. Auf den REM-Aufnahmen (Abb. 13.73) wirken die Eisenspäne, wie beim grünen

Belag auch, länger und schmaler, obgleich sie deutlichere Schleif- und Verschleißspuren aufweisen.

Feine Abriebpartikel haften an der Belagoberfläche wie z.B. den Eisenspänen an, was besonders bei 200-facher Vergrößerung gut zu erkennen ist. Das Verschleißbild ist als moderat zu bezeichnen, wie auch die EDX-Maps belegen und was bedeutet, daß im Allgemeinen die Elementstrukturen (agglomeriert bzw. fein und homogen flächig verteilt) nicht signifikanten Änderungen durch die Reibversuche unterworfen wurden, obgleich insbesondere die Eisenspäne verschliffener sein können. Die chemische Elementanalyse (Abb. 13.74) offenbart einen erhöhten Kohlenstoffanteil am mittleren Reibring, während der Eisenanteil annähernd homogen verteilt ist. Auch beim ECE-kf korrelieren Silizium und Sauerstoff in ihren Verteilungen, wie schon beim NAO, recht gut miteinander, wobei der Sauerstoff am mittleren Reibring weniger präsent ist. Dies mag auch aufgrund des erhöhten Kohlenstoffanteils begründbar sein. Betrachtet man die chemische Zusammensetzung des gelaufenen Belages sowie des Staubes, so zeigt sich, daß der Siliziumanteil erwartungsgemäß hoch ausfällt (Abb. 8.16, rechts). Hinzu kommt eine deutliche Sauerstoffzunahme, so daß sich durch den Reibprozeß Eisen- und Siliziumoxide gebildet haben werden. Auch beim ECE-kf sind die Veränderungen für den analysierten Staub deutlicher als für den untersuchten Belag, die Tendenzen sind dennoch vergleichbar. Damit wird für den ECE-kf gezeigt, daß ein Materialtransfer von der Scheibe auf den Belag bzw. die ausgeprägte Reibschicht erfolgt. Zusammen mit den Analysen der gelaufenen VGS bedeutet dies einen gegenseitigen Materialtransfer, bei dem Kohlenstoff- und Eisenanteile vom Belag auf den Reibring wandern und Silizium und Natrium von der VGS auf den Belag übertragen werden.

Wie bereits bei den zuvor analysierten Belägen zeigt auch der **ECE-mk** verschiedene Belastungsbereiche, die sich anhand unterschiedlicher Färbung (Reibringe) unterscheiden lassen. Die REM-Aufnahmen (Abb.

13.75) verdeutlichen, daß die Eisenspäne kürzer und auch geringfügig breiter ausgeprägt sind als beim ECE-kf. Auch hier zeigen sich, besonders für die Eisenspäne, Verschleiß- bzw. Reibspuren, da die Späne nun verschliffener wirken. Dies ist nicht verwunderlich, da sie Primärplateaus darstellen und demzufolge im direkten Kontakt mit der Bremsscheibe stehen. Auch können, wie schon bei den anderen Belägen zuvor, bei 200-facher Vergrößerung feine anhaftende Abriebpartikel erkannt werden. Die EDX-Maps bestätigen den insgesamt als moderat einzustufenden Verschleißzustand. Die Siliziumanteile nehmen leicht zu, während die Eisenspäne verschliffener erscheinen. Im Rahmen der chemischen Elementanalysen (Abb. 13.76) zeigt sich der Kohlenstoffanteil am mittleren Reibring leicht erhöht. Zwischen Silizium und Sauerstoff zeigen sich gute Übereinstimmungen (vergleichbare Relationen ihres Vorkommens in radialer und tangentialer Ausdehnung), wie schon bei den beiden anderen Belägen zuvor. Das Kupfer ist relativ homogen verteilt, während Eisen am mittleren Reibring geringfügig niedriger verteilt ist. Zu erkennen ist in Abb. 8.16, unten, ein Materialtransfer von der VGS auf den Belag bzw. die Reibschicht in Form von Silizium und Sauerstoff, wobei letzterer auch durch Oxidationsvorgänge nun häufiger als beim grünen Belag vorkommt. Der deutliche Rückgang des Kohlenstoffs zeigte sich ebenfalls bei den zuvor analysierten Belägen. Die Reibschicht (bzw. der untersuchte Staub) weist auch die übrigen Elemente der Matrix auf. Somit gelten die Materialtransfermechanismen von der VGS auf den Reibbelag bzw. die Reibschicht (und umgekehrt) auch für den ECE-mk.

Betrachtet man abschließend und vergleichend die Zusammensetzungen der Reibschichten (Abb. 13.77), so zeigen sich in ihnen die jeweiligen belagtypischen Elemente sowie in jeweils erhöhter Konzentration Silizium und Sauerstoff. Damit wird festgestellt, daß die Reibschicht sich aus Abriebmaterial beider Reibpartner zusammensetzt und ein gegenseitiger Materialtransfer bei allen Reibpaarungen erfolgt. Hinsichtlich der Verschleißspuren ist festzuhalten, daß diese stets moderat ausfallen, so

daß sich zwangsläufig Unterschiede zu den Versuchen mit der Referenzbremse (Kapitel 8.2.3) ergeben werden. Es wurde jedoch gezeigt, daß die Verschleißmechanismen zwischen Grauguß- und Glasversuchen grundsätzlich vergleichbar sind. Die Ausprägung des Verschleisses bzw. der Verschleißspuren ist letztlich das Ergebnis des Belastungskollektives, welches bei den Glasversuchen moderater als beim AK Master ausfällt.

8.2.3 Versuche Referenzbremse

Im Rahmen der physikalisch-chemischen Analysen zu den Versuchen mit einer Referenzbremse sollen zunächst die Ergebnisse der Bremscheiben vorgestellt werden. Die **Graugußscheibe GGS, die gegen den NAO gebremst wurde**, läßt nach dem visuellen Eindruck erkennen, daß der innere Reibradius kaum getragen hat. Der mittlere Bereich indes zeigt deutlich dunklere Einfärbungen, auch Adhäsionsartefakte sind erkennbar. Die Struktur erweist sich verdichteter als bei dem grünen Prüfling und es sind große dunkle Bereiche erkennbar (Abb. 8.17, links). Ebenso lassen sich Schleifspuren als breite Reibringe (200..300 µm) ausmachen. Die dunklen bzw. schwarzen Bereiche werden dem Titan und Zirkonium und abgeschwächt auch dem Magnesium zugeschrieben. Ein Zoom offenbart, daß sich abgesenkte Bereiche (kraterähnlich) mit Abriebmaterial des Belages füllen (Abb. 8.17, rechts).

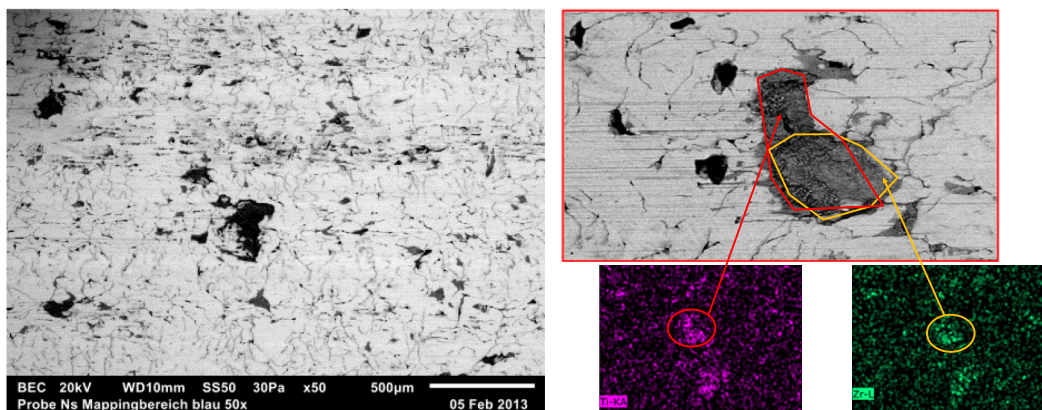


Abb. 8.17: REM-Aufnahme eines Segments der GGS (gegen NAO) nach dem AK Master (links), Elementanalyse – Zoom im Vergleich zum EDX-Mapping (rechts)

In diesen Bereichen ist kein Eisen anzutreffen. Dieses verteilt sich recht homogen über die restlichen Reibringbereiche. Silizium und Aluminium indes verteilen sich in geringer Konzentration homogen und gleichmäßig über die komplette Oberfläche. Linescans bestätigen zudem einen höheren Anteil an Sauerstoff in diesen Bereichen, was mit Oxidationsvorgängen erklärt werden kann.

Die Betrachtung der **Graugußscheibe gegen ECE-kf** offenbart ebenfalls, daß der innere Reibradius weniger getragen hat bzw. geringere Verschleißspuren aufweist. Adhäsionsartefakte sind indes keine erkennbar. Die Oberfläche kann als recht homogen mit deutlich geringeren Rauheiten beschrieben werden.

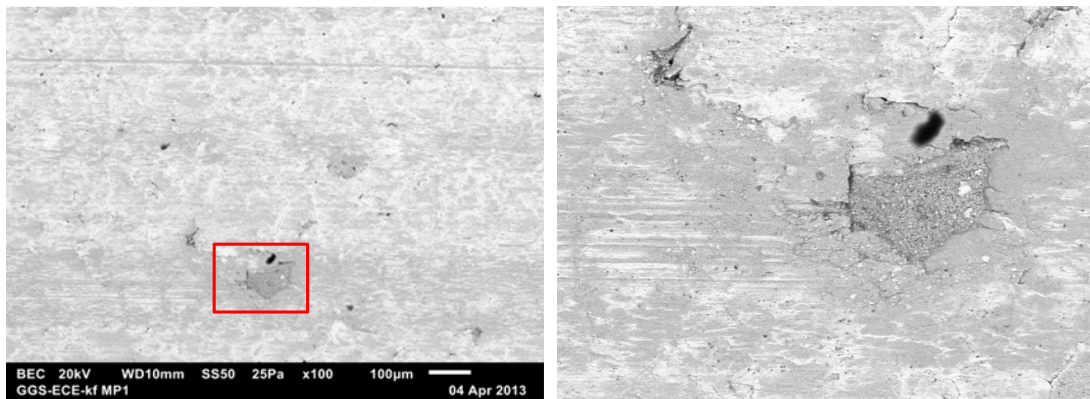


Abb. 8.18: Meßstelle auf GGS (gegen ECE-kf) nach AK Master (links) sowie ein gezoomter Bereich (rechts)

Die REM-Aufnahmen verdeutlichen eine im Vergleich zum grünen Prüfling unterschiedliche Oberflächengestalt (Abb. 8.18). Die Kohlenstoffbereiche sind kaum mehr erkennbar, die schuppigen Bereiche wurden stark komprimiert. Auch hier haben sich erkennbare Reibringe mit einer Breite zwischen 200 und 300 µm eingestellt. Zudem sind einzelne kleine Artefakte erkennbar, welche sich mittels eines EDX-Maps jedoch nicht eindeutig charakterisieren lassen (Abb. 8.18, rechts).

Mit Hilfe eines Linescans kann der Artefakt, dessen Struktur körniger als seine Umgebung ist und der den Eindruck von losen bzw. komprimierten Belagabrieb vermittelt, näher charakterisiert werden. Zu erkennen ist eine

leichte Sauerstoffzunahme in diesem Bereich, begleitet von einem geringen Eisenabfall und einer moderaten Kohlenstoffzunahme. Die Basis für solche Artefakte sind die typischen Kohlenstoffbereiche einer Graugußscheibe. Durch den Reibvorgang setzen sich auf ihnen Abriebpartikel ab, so daß ein dünner Reibfilm entsteht. Dadurch wird der darunter befindliche Kohlenstoffanteil nur noch schwach detektiert (obgleich es sich um einen erhöhten Kohlenstoffanteil im Vergleich zu den Detektionen der benachbarten Bereiche handelt). Der Reibfilm selbst besteht aus einem Eisenoxid, da der Sauerstoffanteil steigt und auch ein deutlicher Eisenanteil vorliegt. Demnach erfolgt ein homogener und gleichmäßiger Transfer der Belagbestandteile auf den Reibring (was das Mapping belegt), während die Inhomogenitäten des Reibrings (Kohlenstoffbereiche) von einer Eisenoxidschicht bedeckt werden.

Die visuelle Analyse der **Graugußscheibe gegen den ECE-mk** zeigt auf, daß der innere Reibradius ebenfalls weniger getragen hat und geringere Verschleißspuren aufweist. Auch zeigt der mittlere Bereich dunklere Einfärbungen mit schwach erkennbaren Adhäsionsartefakten. Im direkten Vergleich zu den übrigen Bremscheiben scheint die Oberfläche körniger bzw. rauer zu sein.

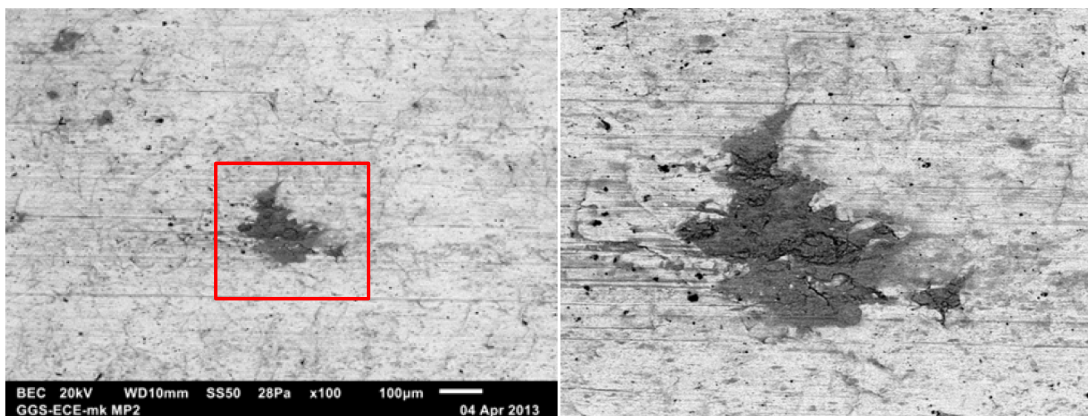


Abb. 8.19: Meßstelle auf GGS (gegen ECE-mk) nach AK Master (links), gezoomter Bereich (rechts)

Die Analyse der REM-Aufnahmen läßt eine strukturiertere Oberfläche als beim ECE-kf erkennen, die jedoch homogener, glattflächiger als beim NAO

ist (Abb. 8.19, links). Der Zoom verdeutlicht die Inhomogenität des Artefakts hinsichtlich seiner Oberflächenbeschaffenheit und seinem Kontrast (Abb. 8.19, rechts). Die EDX-Mappings lassen eine leichte Kupferanhäufung in den dunklen Bereichen erkennen. Damit wird eine Kupferübertragung bzw. -eintrag durch den Belag auf den Reibring bestätigt.

Die Analyse der jeweiligen **Reibbeläge** läßt für den **NAO** die Kohlenstoffbereiche deutlich erkennen (Abb. 13.78). Auch sind großflächige, patchähnliche Bereiche (hellgrauer Kontrast) erkennbar, die aus sehr feinen Partikeln zu bestehen scheinen. Da sie auch nach dem vorsichtigen Abblasen auf der Reibmatrix verbleiben, muß es sich um stark verdichtetes Abriebmaterial mit einer robusten Anbindung an die Belagoberfläche handeln.

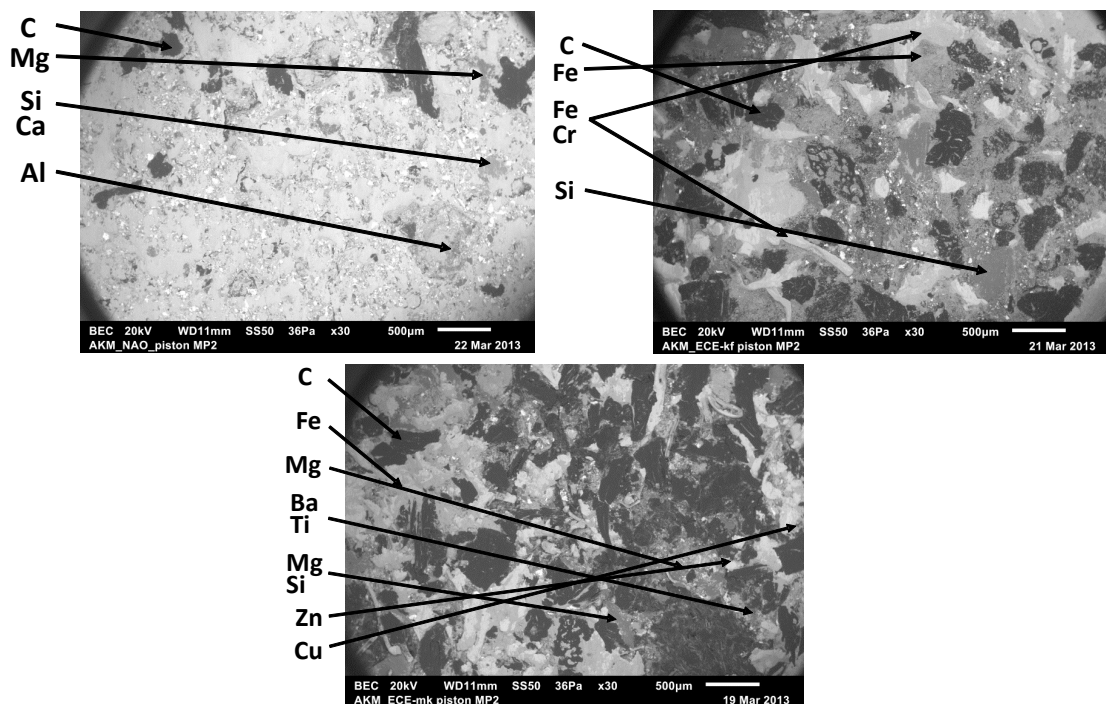


Abb. 8.20: REM-Aufnahmen von NAO (links oben), ECE-kf (rechts oben), sowie ECE-mk (Mitte unten), nach AK Master

Die Analysen verdeutlichen, daß die dunklen Bereiche dem Kohlenstoff zugeordnet werden können (Abb. 8.20, links oben). Der Sauerstoff ist

deutlich über die komplette Oberfläche verteilt, jedoch nicht auf den Kohlenstoffbereichen zu finden. Zu beachten ist, daß das Eisen nun strukturierter erkennbar ist und es dem Materialtransfer aus der GGS entstammt. Die Kohlenstoffbereiche werden von keinem anderen Element bedeckt.

Der **ECE-kf Belag** zeigt ein sehr verschliffenes Bild, bei dem die Schleifspuren (Schleifrichtung in Abb. 13.79 von unten nach oben) deutlich erkennbar sind. In Abb. 8.20 (rechts oben) sind die Kohlenstoffanteile deutlich erkennbar und homogen verteilt. Das Eisen ist nun deutlich flächiger vorhanden, da die Späne abgerieben wurden und die Abriebpartikel sich flächig auf dem Belag mit einem dunkleren Graukontrast verteilen. Dieser hellt sich auf, wenn die Bereiche mit Chrom überlagert sind. Dies wurde bereits für den grünen Belag erkannt. Zudem ist zu erkennen, daß sich Sauerstoff ebenfalls auf diesen Bereichen, an denen sich Eisen findet, detektieren läßt, was mit der Bildung von Eisenoxiden begründet wird.

Für den **ECE-mk** wird eine verschliffene Oberfläche konstatiert, bei der einzelne Eisenspäne nunmehr kaum erkennbar sind (Abb. 13.80 sowie Abb. 8.20, Mitte unten). Sie wurden zerrieben und verteilen sich nun flächig. Der Kohlenstoff nimmt flächenmäßig den größten Anteil an der Belagoberfläche ein. Auf den Eisenbereichen kann ebenfalls Sauerstoff nachgewiesen werden, was mit Eisenoxiden begründet wird. Barium und Titan treten kompaktiert und an den gleichen Stellen auf, während Zink (heller Kontrast) und Kupfer agglomeriert auftreten, wobei letzteres am Kontrast in der REM-Aufnahme jedoch kaum erkennbar ist.

Als Zwischenfazit der REM / EDX-Analysen in Bezug auf die grünen und gelaufenen Reibpartner (gegen Borosilikatglas sowie Grauguß) ist als zentrales Ergebnis die Tatsache zu nennen, daß es jeweils einen Materialübertrag von Scheibe zu Belag und umgekehrt gibt. Dabei fallen belagspezifische Bestandteile auf, die für diese Transfers charakteristisch sind. Sind dies für den NAO das Zirkonium sowie Titan, fällt dem Eisen diese

Rolle beim ECE-kf und ECE-mk zu, wobei bei Letzterem zudem das Kupfer zu nennen ist. Speziell diese Elemente spielen jeweils eine zentrale Rolle beim Materialtransfer und der Ausprägung der Reibschicht bzw. des dritten Reibkörpers.

Der Vergleich zwischen den Belägen nach den Versuchsläufen gegen Borosilikat und dem AK Master (gegen Grauguß) offenbart aufgrund höherer und umfangreicherer Belastungen deutlicher ausgeprägte Reib- und Verschleißspuren für die AK Master-Prüflinge. Die Oberflächen sind hinsichtlich Struktur und Topographie, wobei diese in Kapitel 8.3 noch näher betrachtet wird, jedoch durchaus vergleichbar und lassen auf die gleichen Reib- und Verschleißmechanismen schließen.

8.3 Topographie – Charakterisierungen

Im Zentrum der topographischen Untersuchungen steht die Charakterisierung der Oberflächen von Reibelag und dem Reibring der Bremsscheibe. Dies erfolgt durch die Beschreibung der Oberflächengestalt hinsichtlich Spitzen, Bergen, Tälern und ebenen Flächen (Plateaus). [94], [97]

Da die Vorteile der kontaktlosen Vermessung überwiegen, wird diese in Form der digitalen Mikroskopie und des Keyence VW 9000 Systems genutzt (vorgestellt in [96]). Gemäß [95] vereint sie die Vorteile der Mikroskopie mit denen der Profilmessung. Gegenüber herkömmlichen optischen Mikroskopen haben Digitalmikroskope den Vorteil, daß die Fokustiefe über 20 Mal größer als bei optischen Mikroskopen ist. Somit kann der vollständige Bereich der Vergrößerung scharf abgebildet werden. Zudem kann das Objekt aus verschiedenen, beliebigen Winkeln betrachtet werden und direkte Dimensionsmessungen, wie die Erfassung von Abständen, Winkeln und Radien, sind möglich. Schließlich können Messungen von Höhen und Tiefen sowie dreidimensionale Darstellungen umgesetzt werden. Das verwendete Mikroskop nutzt die Methode der Fokusvariation, die ein Bestandteil der optischen 3D Oberflächenmeßmethoden und in [98]..[100] beschrieben sind.

Als Ergebnis können Aufnahmen, wie sie in Abb. 8.21 dargestellt sind, gewonnen werden. Es können demnach monochromatische Draufsichten erstellt werden, die zudem farblich eingefärbt werden können. Die Farbcodierung repräsentiert dabei die Höhenkomponente. Überdies lassen sich dreidimensionale Darstellungen durch Drehen der Aufnahme erstellen.

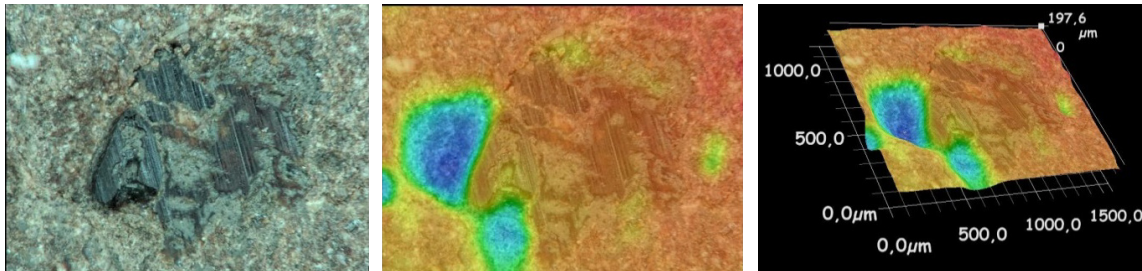


Abb. 8.21: monochrome (links), farbcodierte (Mitte) sowie 3D mikroskopische Topographieaufnahmen eines NAO-Belags, 200-fache Vergrößerung

Wie in Abb. 8.22 beispielhaft für die grünen Reibbeläge dargestellt, werden zunächst Aufnahmen mit 30-facher Vergrößerung von den 9 Meßpunkten mit Hilfe einer Meßmaske erstellt (Abb. 13.9, rechts). Dabei werden die Unterschiede zwischen den ECE-Belägen und dem NAO-Belag sehr deutlich, ohne jedoch tiefgreifender beschrieben werden zu können. Zeigen die ECE-Beläge eine sehr kontrastreiche und mit vielen feinen, unterschiedlichen Details versehene Oberfläche, offenbart der NAO eine recht homogene Gestalt, welche auffällig von größeren Kohlenstoffplateaus überzogen ist.

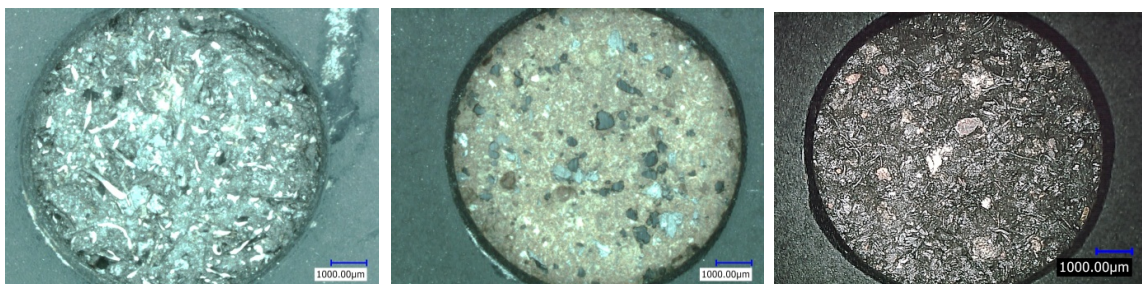


Abb. 8.22: Topographie eines ECE-kf, (links), NAO (Mitte), ECE-mk (rechts)

Mittels weiterer Detailaufnahmen bei 200-facher Vergrößerung an den 9 Meßpunkten kann ein genaueres Bild gezeichnet werden. Die Analyse der

Oberflächen des **ECE-kf** zeigt dabei deutliche Unterschiede zwischen erhabenen und ebenen Bereichen (Abb. 8.23, Mitte).

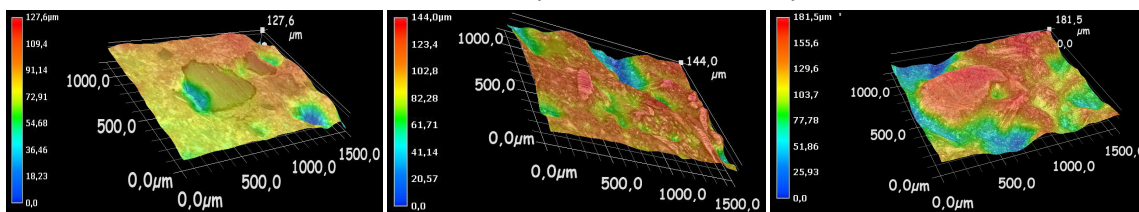


Abb. 8.23: 3D-Topographie nach einer Bedding-Prozedur und vor dem Abblasen für NAO (links), ECE-kf (Mitte) und ECE-mk (rechts)

Auffällig sind spanartige Artefakte, die durch REM / EDX Analysen als Eisenspäne charakterisiert wurden. Die Oberfläche weist Täler und Berge auf, eine insgesamt als heterogen zu charakterisierende Oberfläche kann festgestellt werden. Zwischen den Bereichen deutlicher Höhenunterschiede erfolgen die Übergänge zumeist abrupt, was den heterogenen Oberflächencharakter begründet und den Eindruck einer rauhen Oberfläche vermittelt.

Die typische Oberflächentopographie eines **ECE-mk** findet sich in Abb. 8.23 (rechts). Auffällig sind spanartige Artefakte, die durch REM / EDX Analysen als Eisenspäne charakterisiert wurden, wie dies auch beim ECE-kf der Fall ist. Die Oberfläche weist Täler und Berge auf, eine insgesamt als heterogen zu charakterisierende Oberfläche kann festgehalten werden. Die Übergänge zwischen den Bereichen deutlicher Höhenunterschiede erfolgen auch hier meistens abrupt, was den heterogenen Oberflächencharakter, wie beim ECE-kf, begründet und den Eindruck einer rauhen Oberfläche vermittelt. Auffällig sind zudem vorhandene Plateaus, die den Metallen (Kupfer) oder auch Halbmetallen (Silizium) zugeschrieben werden können. Die Oberflächentopographie des **NAO-Belages** (Abb. 8.23, links) gestaltet sich deutlich homogener als bei den ECE, nur wenige kraterähnliche Bereiche lassen sich erkennen. Auffällig sind die Kohlenstoffplateaus (bereits mittels REM / EDX charakterisiert), die sich zahlreich auf der Belagoberfläche finden lassen. Die Möglichkeit erhabener und abgesenkter Kohlenstoffbereiche verdeutlicht, dass die Flächenpressungen nicht

homogen verteilt sind, so daß durch den Fertigungsprozeß bedingte erhabene Kohlenstoffbereiche nicht vollständig eingeebnet wurden.

Im Folgenden sollen die Belagoberflächen nach den Versuchen gegen die Vollglasscheibe näher betrachtet werden. Zunächst werden die Beläge unmittelbar nach der Reibprüfung und vor dem Abblasen, welches für die REM / EDX Analysen erforderlich ist, charakterisiert. Alle Beläge zeigen eine durch den Reibprozeß geprägte Oberflächentopographie mit deutlichen Reib- bzw. Schleifspuren (Abb. 13.81). Die breiteren Kanäle der Partikelbahnen sind für alle drei Beläge gut zu erkennen. Der NAO scheint die homogenste Oberflächengestalt mit den geringsten Höhenunterschieden aufzuweisen, während beide ECE-Beläge imhomogener wirken, besonders in Hinsicht auf die flächenhafte Strukturgestalt. Dies mag auch an den zahlreichen Eisenspänen liegen, die während der Reibversuche als Primärplateaus agieren. Schön zu erkennen sind ebenfalls die Kupferbestandteile beim ECE-mk, die bräunlich schimmern.

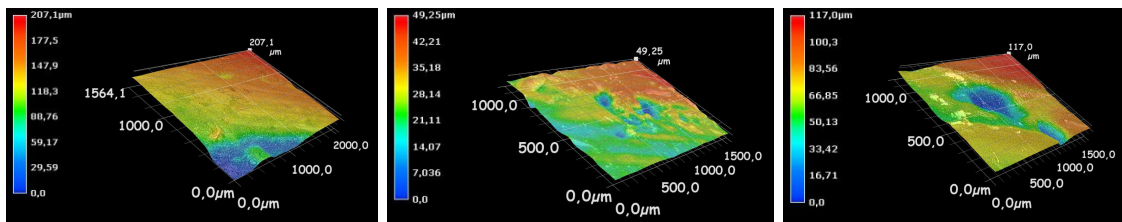


Abb. 8.24: 3D-Topographie nach einer Bedding-Prozedur und vor dem Abblasen für NAO (links), ECE-kf (Mitte) und ECE-mk (rechts)

Wie die globaleren Aufnahmen mit 30-facher Vergrößerung weisen auch die Oberflächen bei 200-facher Vergrößerung deutliche Spuren des dritten Reibkörpers auf (bzw. sind geprägt durch ihn) und wirken sehr stark verschliffen (Abb. 8.24). Dabei haben sich weite Plateaus sowie Reibringe ausgeprägt, die die Kanäle für die Partikelströme repräsentieren. In diesen Kanälen können sich kraterförmige Oberflächenbereiche zeigen, wobei zwischen Kanal und den Reibplateaus ebenfalls deutliche Höhenunterschiede bestehen können. Zumeist jedoch zeigen sich homogenere und flache Plateaus. Dennoch läßt sich qualitativ für den NAO

feststellen, daß er sehr homogen wirkt und große ebenflächige Bereiche aufweist. Die Kohlenstoffbereiche sind kaum erkennbar bzw. vom dritten Reibkörper bedeckt. Die ECE-Beläge verhalten sich beide untereinander ähnlich, eine deutliche Unterscheidung ist nur schwer möglich. Dennoch kann konstatiert werden, daß beim ECE-kf vermehrt längere und schmalere Eisenspäne vorliegen, während sie beim ECE-mk kürzer und breiter erscheinen. Beide ECE wirken weniger homogen als der NAO und weisen kraterförmigere Oberflächen auf.

Das behutsame Entfernen des dritten Reibkörpers durch Abblasen setzt die eigentliche Belagoberfläche frei, um diese topographisch zu untersuchen (Abb. 13.82). Die so freigelegte NAO-Oberfläche ähnelt für die globalere 30-fache Vergrößerung recht stark dem grünen Belag. Sie wirkt sehr homogen, während die Kohlenstoffplateaus deutlich zu erkennen sind. Die beiden ECE-Beläge indes sind sich relativ ähnlich, wobei der ECE-kf ein wenig zerklüfteter als der ECE-mk wirkt.

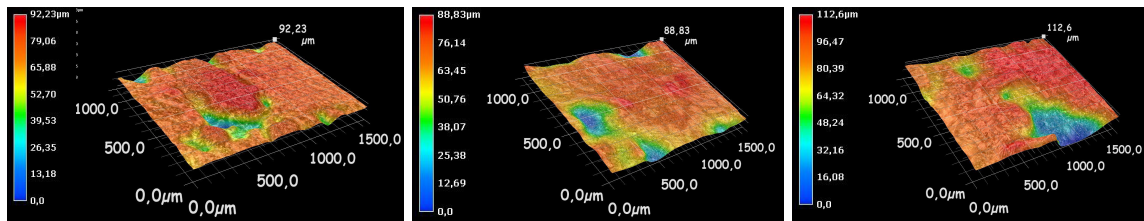


Abb. 8.25: 3D-Topographie nach einer Bedding-Prozedur und Abblasen für NAO (links), ECE-kf (Mitte) und ECE-mk (rechts)

Auch die 200-fache Vergrößerung bestätigt, daß die Oberflächen nun weniger homogen bzw. zerklüfteter wirken, was jedoch für die ECE mehr gilt als für den NAO. Dieser zeigt weiterhin großflächige Bereiche der Grundmatrix (s.a. EDX-Elementverteilung: der NAO ist sehr homogen gemischt) sowie gut zu erkennende Kohlenstoffbereiche, welche abgesenkt oder erhaben auftreten können. Letztere bedeuten zwar Höhendifferenzen, jedoch treten die Auffälligsten im Übergangsbereich zwischen Reibmatrix und Kohlenstoffplateau auf. Bei den ECE-Belägen weisen die Eisenspäne sowie weitere metallische Plateaus deutliche Verschleißspuren auf und sind verschliffen. Unterscheidungen zwischen

den beiden ECE sind abermals nur schwer möglich, obwohl die unterschiedlichen Eisenspanausprägungen wieder erkannt werden können. Die vorhandenen Krater und Vertiefungen fallen großflächiger als beim NAO aus.

Im weiteren sollen die Oberflächen der Reibringe aus den Versuchen mit der Referenzbremse mit 30-facher Vergrößerung charakterisiert (Abb. 13.83). Mit Hilfe mikroskopischer Aufnahmen soll sich ein guter globaler Eindruck von den Reibringen ergeben.

Beim **Grauguß gegen NAO** sind dunkel gefärbte Bereiche oder Flecken auffällig. Beachtet man die Scheibendrehrichtung, entsteht der Eindruck, daß sich eine Art Spur bzw. Schweif hinter ihnen (in Drehrichtung gesehen) ausprägt. Besonders die Mitte und der äußere Bereich weisen diese Artefakte auf, der innere Radius zeigt dies weniger stark ausgeprägt. Dies bestätigt die zuvor vorgestellten REM / EDX-Ergebnisse sowie Verschleißresultate, wonach der innere Reibring weniger getragen hat und demnach auch weniger stark verschliffen ist und die Artefakte Bereiche darstellen, die sich mit Bestandteilen des Reibbelages gefüllt haben. Somit erlaubt diese Analyse die Zusammenführung von globalen Verschleißdaten und sehr lokalen (mikroskopische Skala) Elementanalysen.

Der **Grauguß gegen ECE-kf** weist deutliche Reibspuren bzw. Verschleißbahnen auf. Die Oberfläche scheint „körniger“ und weniger verschliffen zu sein als beim NAO und auch beim ECE-mk. Dunkle Flecken wie beim NAO können nicht festgestellt werden, wohl aber helle Bereiche. Diese zeigen sich auch bei den REM / EDX-Analysen und zeigten sich dort als ursprüngliche kohlenstoffhaltige Vertiefungen, die mit Eisenoxid aufgefüllt wurden, so daß ein Materialübertrag vom Belag festgehalten werden kann. Die äußeren und mittleren Reibradien zeigen breitere Reibringe, so daß hier breitere Bereiche getragen haben müssen. Die unterschiedliche Einfärbung korreliert mit dem Übertrag an Kohlenstoff und verdeutlicht den Wechsel der lastragenden Reibringe. Innen sind die Reibringe weniger breit ausgeprägt und weisen eher eine homogene

Grauwertverteilung auf, was ebenfalls mit den Verschleißergebnissen zu korrelieren vermag. Der innere Reibring ist weniger stark in die Kraftübertragung eingebunden und weist daher geringere Verschleißspuren auf.

Vereinzelt können Artefakte (dunkle Flecken) wie beim NAO auch beim **Grauguß gegen ECE-mk** ausgemacht werden. Diese sind in Abmessungen und Anzahl jedoch deutlich schwächer ausgeprägt, zeugen aber ebenfalls vom Materialübertrag des Belages auf die Scheibe, da sich Kupferanteile dort finden lassen (s.a. REM / EDX-Analysen). Die Oberfläche ist deutlich „verschliffener“ als die des ECE-kf und vergleichbar mit der des NAO. Die Reibringe (lasttragende Bereiche bzw. Spuren) sind außen und in der Mitte unterschiedlich eingefärbt, was mit dem ECE-kf vergleichbar ist, weisen indes aber größere Breiten auf. Ebenfalls wie beim ECE-kf ist innen eher eine homogene Grauwertverteilung erkennbar, was auf nur geringe und relativ homogene Flächenpressungsverhältnisse schließen läßt und gut mit den Verschleißdaten erklärt werden kann.

Diese umfassende Reibringcharakterisierung erlaubt es schließlich, unter Zusammenführung lokaler (licht- und rasterelektronenmikroskopischer Analysen) und globaler Ergebnisse (orts aufgelöste Verschleißdaten), das Reib- und Verschleißverhalten in Bezug auf die einzelnen Beläge zu erklären.

Die Oberflächen direkt nach dem AK Master sind für die **drei Beläge** vergleichbar mit jenen, die bereits zuvor (Beläge direkt nach Reibversuchen gegen Glas bzw. VGS) vorgestellt wurden, weshalb an dieser Stelle auf eine Darstellung verzichtet wird. In Abb. 13.84 sind die Oberflächen nach dem behutsamen Entfernen der losen Abriebprodukte dargelegt. Die Betrachtung bei 30-facher Vergrößerung zeigt vergleichbare Strukturen wie sie bereits nach den Versuchen gegen die VGS zu erkennen waren. Der NAO besitzt eine homogene Struktur, die durch auffällige Kohlenstoffpatches geprägt ist. Die ECE-Beläge sind sich relativ ähnlich und vergleichbar, obgleich der ECE-kf abermals leicht zerklüfteter als der ECE-

mk wirkt. Die Eisenspäne wurden in beiden Fällen deutlich durch den Reibvorgang abgeschliffen.

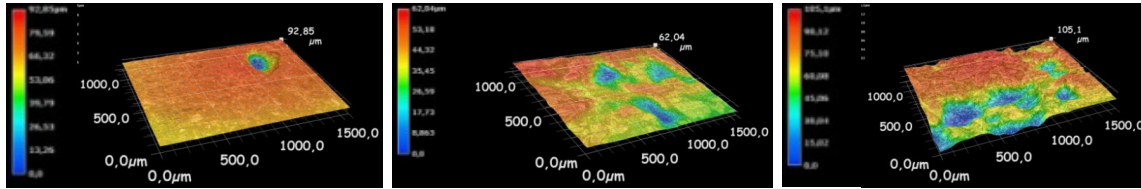


Abb. 8.26: 3D-Topographie nach dem AK Master für NAO (links), ECE-kf (Mitte) und ECE-mk (rechts)

Auch die 200-fache Vergrößerung bestätigt die Ergebnisse aus dem Bedding gegen die VGS, wonach der NAO weite homogene und ebenflächige Bereiche aufweist. Der Kohlenstoff (in Gestalt von Patches) hebt sich vom restlichen Grundmaterial ab (erhaben oder abgesenkt) und die Übergangsbereiche zwischen Kohlenstoffplateaus und dem restlichen Grundmaterial stellen deutliche Höhendifferenzen dar. Beide ECE-Beläge weisen recht ähnliche Oberflächengestalten auf (was bereits mittels der REM-Aufnahmen gezeigt wurde). Sie sind zerklüfteter und zeigen flächenmäßig größere Krater als der NAO, wobei die Eisenspäne deutlich erkennbar sind. Diese wirken jedoch aufgrund der Reibvorgänge deutlich verschliffener.

In Bezug auf die Versuche gegen die VGS zeigt sich die Oberflächengestalt vergleichbar, so daß festgehalten wird, daß ähnliche Verschleißmechanismen vorliegen. Zwar bestehen Unterschiede zwischen den absoluten Höhenunterschieden, jedoch fallen diese nicht allzu deutlich aus. Die Tendenzen sind vergleichbar und zeigen, rein quantitativ, keine signifikanten Unterschiede zwischen den Belägen

Die Zusammenführung der Ergebnisse der grünen und gelaufenen Beläge (gegen Grauguß bzw. Borosilikatglas) zeigt, daß qualitativ gesehen der NAO der Belag mit der homogensten Oberfläche ist, während die der ECE-Beläge zerklüfteter und kraterförmiger wirken. Der ECE-kf weist längere und zum Teil schmalere Späne auf, während der ECE-mk kürzere und breitere Späne

besitzt. Diese Charakteristik bleibt auch für die gelaufenen Beläge gültig, obgleich zum Teil deutliche Reib- und Schleifspuren erkannt werden.

8.4 Kompressibilitätsuntersuchungen

Die Kompressibilität ist eine wesentliche physikalische Belageigenschaft und findet sehr häufig im Kontext von NVH-Fragestellungen Verwendung. Da erwartet wird, daß insbesondere eine lokale Steifigkeitsverteilung einen Einfluß auf das Reibverhalten bzw. die Patchdynamik in der Reibzone besitzt, soll eben jene näher untersucht werden. Die Methode zur Steifigkeitsbestimmung orientiert sich zwar an einem international anerkannten Prüfstandard, wurde jedoch an die Bedürfnisse speziell einer lokalen Kompressibilitätsprüfung angepaßt. Um den lokalen Charakter der Methode zu unterstreichen, erfolgt eine Klassifizierung der Kompreßwerte hinsichtlich ihrer Position auf der Reibone, so daß eine Unterteilung in entsprechende radiale und tangentiale Bereiche gegeben ist.

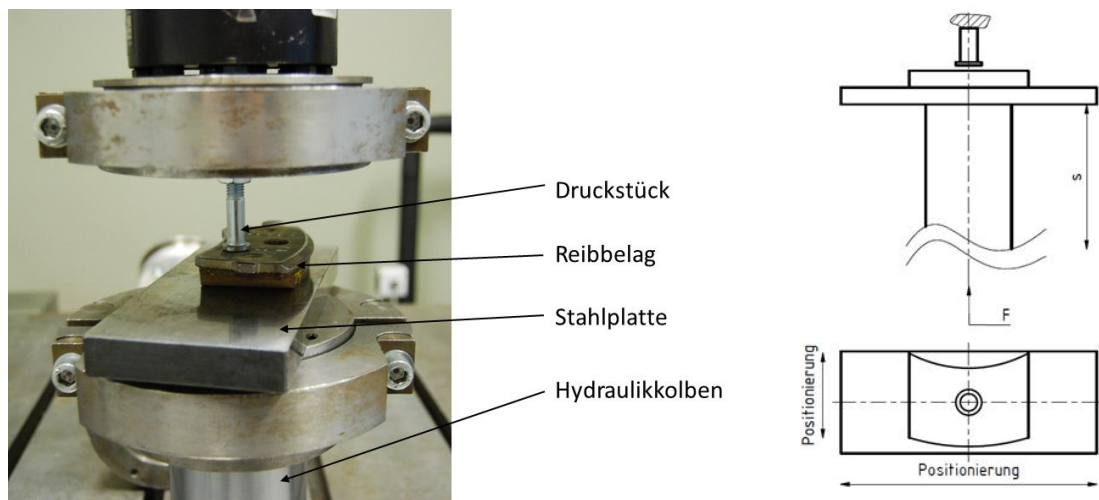


Abb. 8.27: Prüfumgebung „Hydropulser“ (links) sowie Schema des Versuchslayouts (rechts)

Die genutzte **Prüfumgebung** stellt ein Einzylinder-Hydropulser dar. Sein Druckstempel aktuiert von unten nach oben, während das Druckstück an der Oberseite fixiert ist und somit die Gegenbelastung auf die Rückenplatte darstellt. Der Belag selbst liegt auf einer massiven Stahlplatte (Höhe: 10

mm) mit der Reibmatrix auf und wird von Hand positioniert, um den jeweiligen Meßpunkt zu berücksichtigen (Abb. 8.27).

Aus dem möglichen Meßbereich auf der Rückenplatte ergeben sich insgesamt 7 Meßstellen, um lokale Kompressibilitätsunterschiede zu erfassen. Die Wegmessung erfolgt intern über den Hydropulsprüfstand. Ihre Genauigkeit richtet sich nach dem Bereich der Verfahrswege und wird mit 0,25 % (Bereich: 10 mm) bzw. 0,38 % (Bereich: 12 mm) angegeben, was Abweichungen von 25 bzw. 45,6 µm entspricht. Auch die Genauigkeit der Kraftmessung kann als hoch eingeschätzt werden: sie wird mit 0,03 % angegeben, was einer Abweichung von 7,5 N (bei einem Maximalwert von 50 kN) entspricht.

Als **Prüflinge** werden die bekannten Belagkonzepte genutzt. Somit soll es möglich sein, etwaige Korrelationen zwischen der lokalen Patchdynamik und lokalen Kompressibilitätsunterschieden aufzuzeigen. Die Beläge sind eingelaufen und wurden nach den in-situ Versuchen vermessen.

Der sich ergebende Meßbereich nimmt die Dimensionen 35 x 55 mm an (Abb. 13.85). Berücksichtigt werden muß die Zugänglichkeit auf der Rückenplatte. Zu beachten ist ebenso, daß sowohl die Bereiche der Shimbefestigung (Nieten) als auch das „Angstloch“ für die Messungen ausgespart werden. Daneben beschränken die Chamfer der Reibmatrix den Meßbereich. Daher wird ausschließlich auf Höhe der vollständigen Matrix gemessen, um ein Verkippen des Belages zu vermeiden.

Die **Prüfprozedere** (Versuchsdurchführung und Randbedingungen) ist zwar an die ISO 6310 (s.a. [37]) angelehnt, wurde jedoch an die Prüfumgebung angepaßt. Insgesamt werden 3 Belastungsreihen pro Meßstelle umgesetzt (Abb. 13.86). Die Umsetzung des Prozederes erfolgt automatisiert, die Werte für Kraft und Weg werden mit einer Rate von 100 Hz abgetastet.

Die **Analysemethode** sieht die Bestimmung der jeweiligen Verformungen vor, um sie für alle Meßpunkte in Form einer Matrix in einem Diagramm darzustellen. Die Gestaltung der Matrix läßt sehr leicht den direkten Bezug zu den Meßpunkten auf dem Reibbelag zu, wie Abb. 8.28 verdeutlicht.

Somit ist eine schnelle Zuordnung im Hinblick auf die physikalisch / chemischen Analysen sowie die Visualisierungsmessungen möglich.

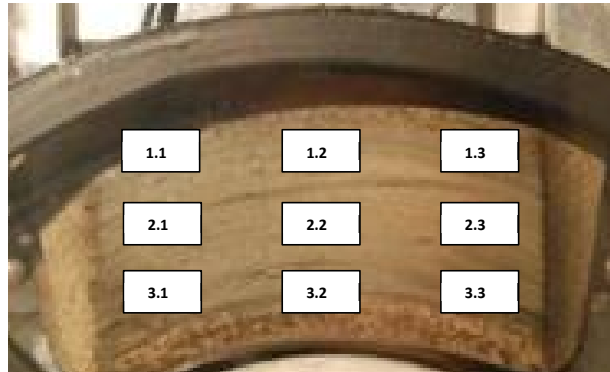


Abb. 8.28: Zuordnung der Meßpunkte zu den in-situ Visualisierungsmessungen

Dargestellt werden im folgenden die **Ergebnisse** der Zyklen 1 und 3. Anhand des **NAO** Belages soll zunächst die Güte der Reproduzierbarkeit dargelegt werden (Abb. 8.29). Hierzu erfolgte ca. 30 Minuten nach der ersten Messung eine zweite Meßreihe.

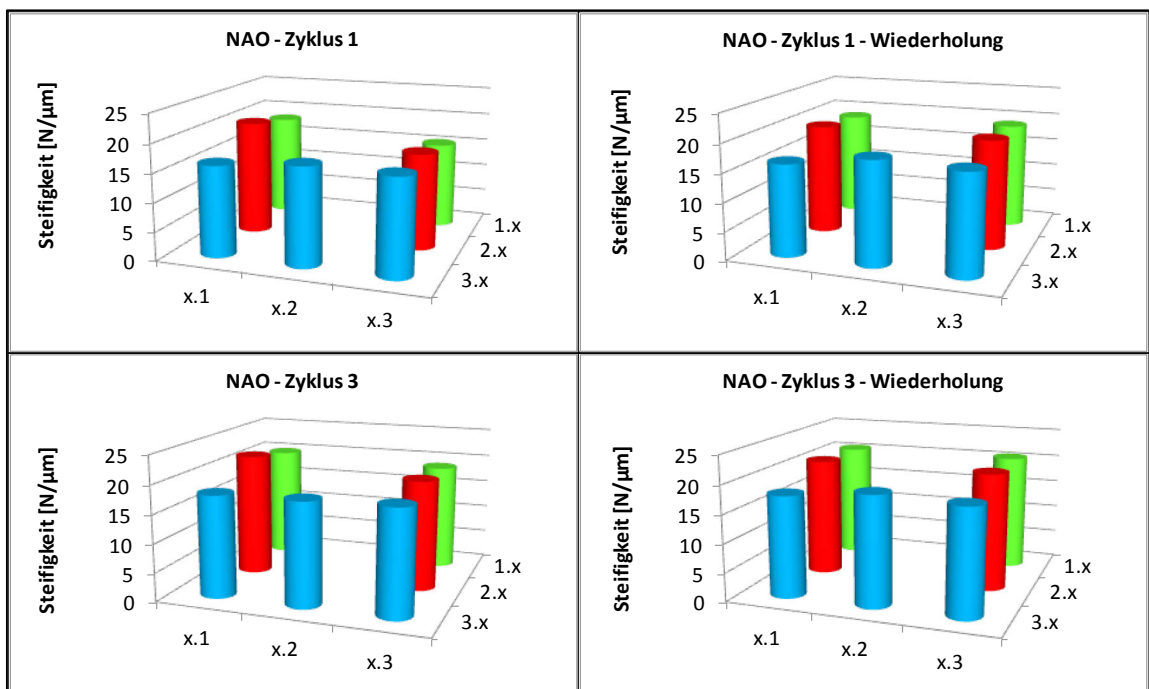


Abb. 8.29: Steifigkeitsverteilung eines NAO-Belages

Innerhalb von den einzelnen Zyklen einer Meßreihe zeigen sich keine Auffälligkeiten, da die Steifigkeitsverteilung annähernd konstant bleibt. Zwischen den Versuchen zeigen sich für Zyklus 3 höhere Steifigkeiten als für Zyklus 1, da der Belag bereits zweimal komprimiert wurde. Dies führte zu Setzungserscheinungen (Hystereseeffekte), welche für die Steifigkeitszunahme verantwortlich sind. Auch in diesem Fall bleibt die Steifigkeitsverteilung für die verschiedenen Meßpunkte vergleichbar. In Bezug auf eben jene Verteilung werden leicht erhöhte Steifigkeiten am mittleren Reibring erkannt. Diese verringern sich in Richtung Auslauf. Die Ein- und Auslaufbereiche lassen für den äußeren und inneren Reibring jedoch keine eindeutigen Unterschiede erkennen.

Für den **ECE-kf** sind die Ergebnisse in Abb. 8.30 dargestellt. Hier zeigen sich höhere Steifigkeiten im Einlaufbereich, zum Auslaufbereich weisen sie eine abnehmende Tendenz auf.

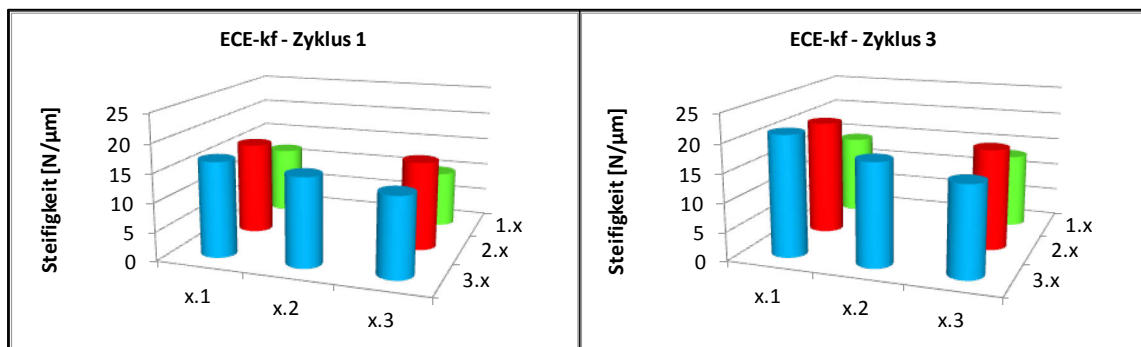


Abb. 8.30: Steifigkeitsverteilung eines ECE-kf-Belages

Der mittlere und innere Reibring weisen höhere Steifigkeiten als der äußere Reibring auf. Damit läßt sich festhalten, daß sich der Einlauf in Kombination mit dem mittleren Reibring sehr steif verhält.

Auch für den **ECE-mk** können erhöhte Steifigkeitswerte für den mittleren Reibring festgestellt werden (Abb. 8.31). Zwischen dem Ein- und Auslaufbereich sind indes keine eindeutigen Unterschiede auszumachen.

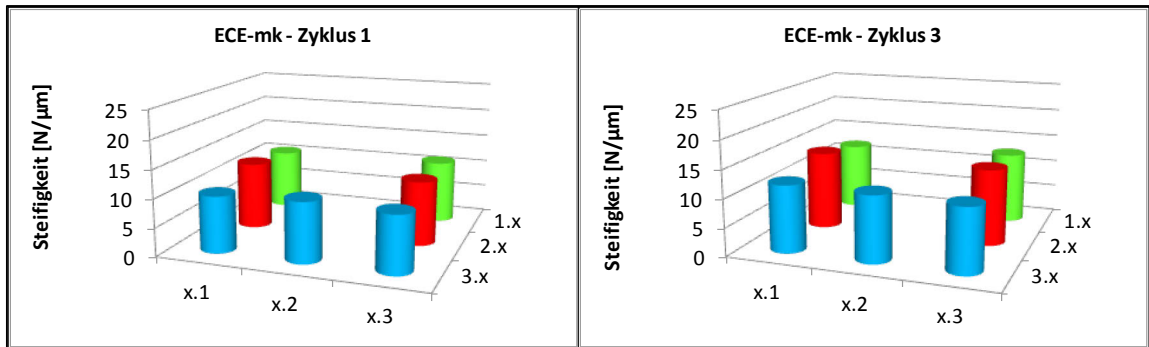


Abb. 8.31: Steifigkeitsverteilung eines ECE-mk-Belages

Zusammenfassend sei bemerkt, daß die Ergebnisse der lokalen Kompressibilitätsversuche eine Steifigkeitsverteilung aufgezeigt haben, die mit den Erkenntnissen der Visualisierungsversuche korreliert. Demnach bedeuten die höheren Steifigkeiten im Einlauf und Bereich des mittleren Reibrings des Bremsbelages erhöhte Flächenpressungen in eben jenen Reibzonenbereichen und verdeutlichen deren Bedeutung für das tribologische Verhalten der Reibpaarung. Konkret zeigte sich dies u.a. bei den Naßreibversuchen sowie den Thermoelastischen Instabilitäten, bei denen die angesprochenen Reibzonenbereiche aufgrund der höheren Steifigkeit entscheidend für das Reibverhalten (beschleunigtes Abtrocknen dieser Reibzonenbereiche) bzw. die Ausprägung von Hitzeflecken waren.

8.5 Porositätscharakterisierungen

Organische Bremsbeläge für Fahrzeugradbremsen sind hochkomplexe und hoch entwickelte Verbundwerkstoffe. Es ist bekannt, daß sie eine poröse Struktur besitzen. Dies ist u.a. begründet in der Materialzusammensetzung. Der Reibkuchen besteht aus zahlreichen verschiedenen Bestandteilen, die vermischt und anschließend verpreßt werden. Das Ergebnis sind nicht nur anisotrope Materialeigenschaften, sondern auch mitunter hohe Porositätswerte. Eine weitere Ursache stellt der Fertigungsprozeß selbst sowie in Kombination mit besonderen geometrischen Abmessungen dar. Verschiedene Fertigungstechnologien, insbesondere Kalt- und Heißpreßverfahren, beeinflussen das Porositätsverhalten unterschiedlich.

Dies ist zudem interessant, wenn bestimmte Belagabmessungen realisiert werden müssen. Besonders große Beläge (großes Länge-Breite-Verhältnis) bergen die Gefahr einer inhomogenen Porositätsverteilung.

Die Auswirkungen lassen sich tribologisch über die Reibschichtbildung und die Reibwertausprägung beschreiben, physikalische Größen beziehen sich indes auf die Kompressibilität und Dämpfung. Unterschiedliche Porositäten können auch das Verschleißbild bestimmen. Speziell inhomogene Porenverteilungen begünstigen Schrägverschleiß.

Bisherige Ansätze zielen mit der Dichte- bzw. Porositätsbestimmung sowie der Kompressibilitätsbestimmung auf globale Kennwerte, die lokale Besonderheiten nicht widerspiegeln. Zu Phänomenen wie Schrägverschleiß, nieder- und hochfrequente Störerscheinungen sowie variierende Flächenpressungsverhältnisse können auf diese Weise nur bedingt Korrelationen aufgezeigt werden.

Mit der Nutzung einer 3D Computertomographieanlage wird ein neuartiger Ansatz verfolgt. Es können Reibbeläge im Mikrometerbereich komplett oder in Form von zugeschnittenen Proben vermessen werden. Anschließend erfolgen Analysen der Schnittbilder in axialer, tangentialer und radialer Richtung, um die Porositäten lokal aufzulösen und räumliche Verteilungen zu bestimmen. Damit ist es möglich, Rückschlüsse auf die zuvor vorgestellten in-situ Visualisierungsergebnisse sowie die bisherigen tribologischen, physikalischen und chemischen (orts aufgelösten) Untersuchungen zuzulassen.

8.5.1 Meßverfahren

Bei der Computertomographie durchdringt die kegelförmige Strahlung einer Röntgenröhre den Prüfling und zeichnet auf dem räumlich dahinter befindlichen Flachbettdetektor ein vollständiges Bild des Prüflings, welches auch Projektion genannt wird. Die Projektionen werden aus verschiedenen Richtungen erstellt und einer Rekonstruktion zugeführt. Die Meßdaten beinhalten die gesamte Detektorfläche, die Rekonstruktion hingegen nur den festgelegten Bereich. Das für die Untersuchungen genutzte System ist

ein Computertomograph RayScan 200, welcher eine dreidimensionale Komplettermessung des Prüflings erlaubt. Der Prüfling wird auf einen Drehteller befestigt, wobei als Prüflingsunterlage meist Styropor Verwendung findet, da es nur wenig Röntgenstrahlung absorbiert und somit die Ergebnisse nicht signifikant verfälscht. Wichtig ist die genaue Positionierung der Probe bzw. der Winkel, unter dem die Strahlung auf sie einfällt. Berücksichtigung finden üblicherweise 45° oder 90° Einfallswinkel, was u.a. auch Einfluß auf die Voxelgröße (korreliert mit der Auflösung) hat. Für den erstgenannten Fall können kleinere Voxelgrößen erzielt werden, was gleichbedeutend mit höheren Genauigkeiten bzw. Auflösungen ist. Es sind ferner die Werte für Strom und Spannung vorzugeben (Definition der Strahlintensität), woraus sich die eingebrachte Leistung und die Fähigkeit der Objektdurchdringung ergibt.

8.5.2 Defektstellenanalyse

Für die Datenaufbereitung und die Markierung der Defektstellen wird die Software VGStudio MAX der Volume Graphics GmbH (Heidelberg) genutzt. Sie bestimmt aus dem Voxelbild jeder CT-Aufnahme die Porengröße, Anzahl und Porosität mit Hilfe einer vorgegebenen Referenzgeometrie. Die Volumenkörperaufnahmen des CT liegen zunächst als Grauwertbilder mit 65000 Grauwertstufen vor. Diese Graustufen repräsentieren die Elementdichte, was bedeutet, daß ein heller Kontrast ein schweres Element (hohe Dichte) beschreibt und ein dunkler Kontrast ein leichtes Element (geringe Dichte). Anhand von manuellen Kalibrierungen wird der Auswertung (bzw. der VGStudio MAX Software) der Grauwert von Luft (mittels eines ROI der Umgebung; ROI = Region of Interest, engl.) zugewiesen. Nach diesem Grauwert wird anschließend im Bereich des Prüflings (der ebenfalls als ROI definiert wird) gesucht. Die detektierten Bereiche (Pixel) als Ergebnis der Analyse entsprechen dann den Defektstellen bzw. Poren im betrachteten Bereich, welcher im vorliegenden Fall der Reibmatrix entspricht.

8.5.3 Datenaufbereitung

Die Vermessung mittels CT berücksichtigt zunächst den dreidimensionalen Volumenkörper, der auch die Basis für die Defektstellenanalyse darstellt. Um neben einer subjektiven Betrachtung auch objektive qualitative und quantitative Erkenntnisse in Form von Kennlinien zu erhalten, sind weitergehende Schritte notwendig.

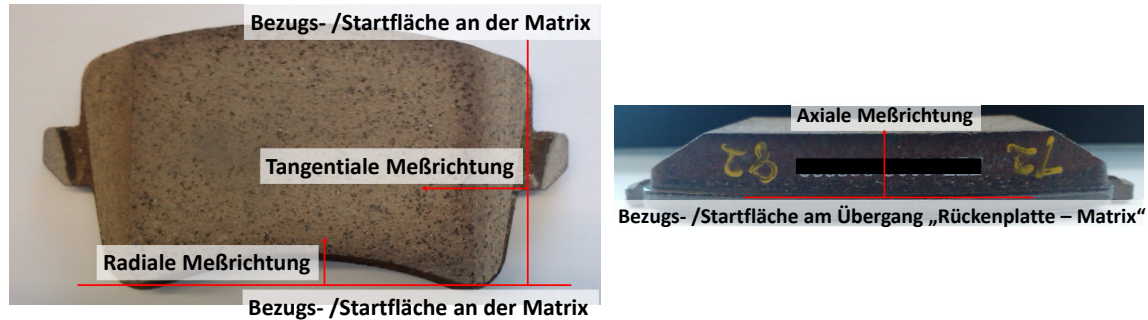


Abb. 8.32: Darstellung der Meßrichtungen sowie der Bezugsflächen für die virtuellen Schnitte

In Abb. 8.32 ist die Ausgangsbasis für virtuelle Schnitte, die ebenfalls mit der Software VGStudio MAX am Volumenkörper vorgenommen werden, dargestellt. Diese Schnitte beziehen sich auf das Koordinatensystem der Radbremse und sind entsprechend in axial, tangential und radial zu unterscheiden. Wichtig ist zudem die Bezugsfläche, die stets die Belagmatrix bildet. Beispiele für die jeweiligen Schnittbilder sind Abb. 8.33 dargestellt.

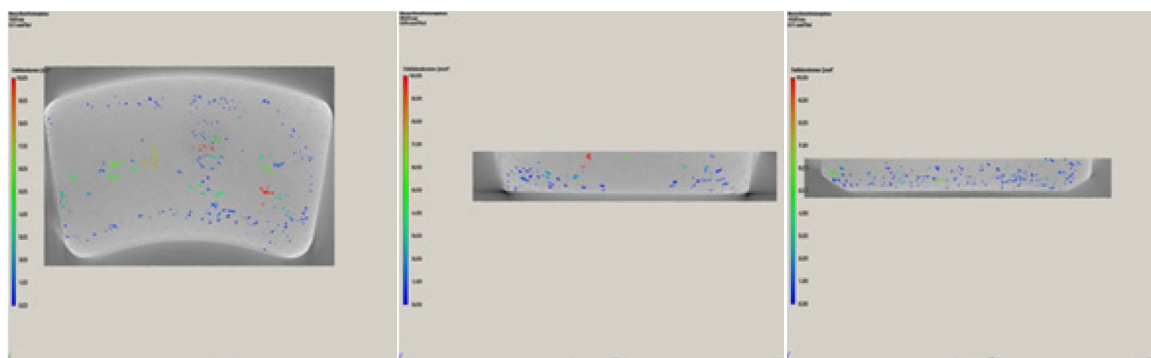


Abb. 8.33: Schnittbilder eines Belages in axialer (links), tangentialer (mitte) und radialer (rechts) Richtung

Sie stellen die Basis für die Auswertung der Defektstellen dar. Obwohl es zweidimensionale Schnitte sind, erkennt man schnell die Volumenanteile der Poren (skalierte Einfärbung) am gesamten Volumenkörper.

Diese Volumeninformation ist zwar für die Extraktion der Schnittbilder beibehalten worden, wird jedoch nicht für die Analysen genutzt. Die Schnitte selbst erfolgen jeweils mit einer Weite von 200 µm (jeweils in axialer, radialer und tangentialer Ausdehnung). Zu beachten sind die Belagabmessungen, so daß sich aufgrund der CT-Sensorspezifikation Auflösungen von rund 200 µm für die axiale, radiale und tangentiale Ausdehnung ergeben. Damit sind zudem die minimal möglich detektierbaren Porenabmessungen definiert.

8.5.4 Datenanalyse

Die automatisierte Bildverarbeitung stellt den letzten Schritt dar, um Aussagen zur räumlichen Porositätsverteilung zu erhalten. Im Rahmen einer **Vorverarbeitung** werden die Einzelbilder der virtuellen Schnitte eingelesen. Zudem ist die Fläche der Reibmatrix als Region of Interest (ROI) zu markieren. Die folgende **Segmentierung** sieht eine Histogrammerstellung vor, die als Grauwertverteilung eines Bildes umgesetzt wird. Dies erlaubt eine Schwellwertsetzung für die Binarisierung, was die Basis zur Bereitstellung der Segmente bedeutet. Diese repräsentieren die Poren der Reibmatrix. Die anschließende **Merkmalsbestimmung und -extraktion** nutzt die zuvor erstellten Segmente, die durch mindestens einen Pixel repräsentiert werden. Über einen zuvor eingelesenen Maßstab sind Berechnungen zur Merkmalsextraktion möglich. Als Merkmale dienen die Porenanzahl, gesamte Porenfläche, einzelne Porenfläche sowie die Gesamtfläche der Reibmatrix. Durch mathematische Manipulationen lassen sich zudem weitere Merkmale wie die mittlere Porenfläche und relative Porenfläche berechnen.

8.5.5 Besonderheiten der Methodenentwicklung

Im Rahmen der Methodenentwicklung sind einige Besonderheiten erkannt und berücksichtigt worden, die im folgen kurz vorgestellt werden sollen. Damit soll es auch möglich sein, die Güte und Qualität der Methodik und ihrer Ergebnisse einschätzen zu können.

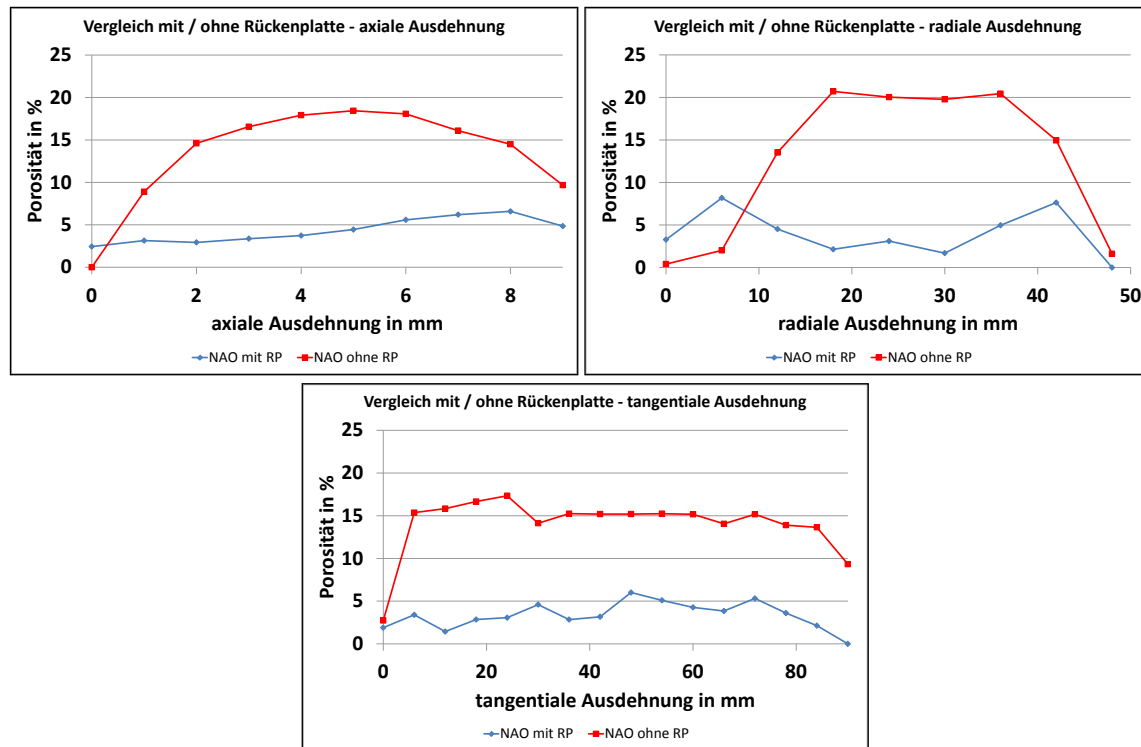


Abb. 8.34: interpolierte Porositätsverläufe für eine Reibmatrix mit und ohne Rückenplatte

In einem ersten Schritt ist der Einfluß der Probengestaltung, zunächst in Form eines Komplettbelages sowie einer Reibmatrix, die von der Rückenplatte mechanisch entfernt wurde, zu untersuchen. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde der Komplettbelag zunächst mittels CT vermessen, anschließend wurde ihm die Rückenplatte entfernt und eine erneute Messung erfolgte (Abb. 8.34).

Die Ergebnisse (interpolierte Kurvenverläufe der relativen Porosität) werden zunächst in axialer Ausdehnung gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß Abschattungen durch die Rückenplatte vorhanden sind. Dies ist zunächst insofern kritisch, als das sich die qualitativen Kurvenverläufe

unterscheiden. Auch fällt die Porosität ohne Rückenplatte deutlich höher aus. Ähnliches gilt für die radiale Ausdehnung. Betrachtet man hingegen die tangentielle Ausdehnung, zeigt sich der Einfluß der Rückenplatte als nahezu konstant. Qualitativ sind ähnliche Verläufe erkennbar, jedoch lassen sich hier höhere Porositäten bei der Matrix ohne Rückenplatte feststellen. Die Absorption der Röntgenstrahlung durch die Rückenplatte wird als verantwortlich angesehen für die Unterschiede in der Defektstellendetektion.

Um auch den Einfluß der Probengröße zu untersuchen und damit die Frage zu beantworten, ob ein kompletter Reibkuchen anstatt kleinerer Probenzuschnitte korrekt untersucht werden kann, erfolgt ein Direktvergleich zusammen mit dem ursprünglichen Komplettbelag (Abb. 13.87). Hierfür wird aus einem zuvor vermessenen Reibkuchen ein Probenzuschnitt extrahiert, der jedoch in seiner tangentialen Ausdehnung unverändert belassen wurde.

Auch wenn der Einfluß der Rückenplatte erwartungsgemäß deutlich ausfällt, bestehen zwischen der Matrix ohne Rückenplatte sowie der zugeschnittenen Matrixprobe nur geringe Unterschiede. Daraus wird geschlußfolgert, daß weitere Probenzuschnitte nicht erforderlich sind und der komplette Reibkuchen korrekt vermessen werden kann.

Aufgrund der großen Anzahl aus auszuwertenden Schnittbildern ist eine automatisierte Auswertung anzustreben. In einem ersten Schritt ist die Reibmatrix als ROI (engl.: Region of Interest) aus den jeweiligen Einzelbildern automatisch zu extrahieren. Das Ziel ist somit die Separierung der Reibmatrix vom Hintergrund sowie Bestimmung der jeweiligen Matrixquerschnittsfläche, um im weiteren nicht nur die Poreanzahl auswerten zu können, sondern auch die relative Porosität. Hierfür erfolgt zunächst eine Einfärbung des Hintergrundes, um anschließend einen RGB-Schwellwert zu wählen, mit dessen Hilfe der Hintergrund von der eigentlichen Reibmatrix separiert werden kann.

Der gewählte Schwellwert beeinflusst nicht nur die Querschnittsfläche bzw. die Güte der Matrixseparierung, sondern auch direkt die ermittelte relative Porosität (Abb. 13.88). Mit einem angepaßten und korrekten Schwellwert lassen sich jedoch sehr gute Ergebnisse erzielen, die nur geringe Abweichungen zu manuellen Auswertungen aufweisen (Abb. 13.89).

Als Fazit ist festzuhalten, daß für die automatische Erkennung der Reibmatrix (notwendig zur Bestimmung der relativen Porosität) ein entsprechender korrekter Schwellwert definiert werden kann. Dieser ist für jedes Belagkonzept zu adaptieren, kann jedoch für Chargenvergleiche unverändert bleiben.

Ist die Reibmatrix vom Hintergrund separiert, kann die automatisierte Detektion von Poren für die jeweiligen Schnittbilder, die im weiteren die Basis zur Berechnung der relativen Porosität darstellt, anhand einer weiteren Schwellwertsetzung erfolgen.

Um den Einfluß bewerten zu können, erfolgte eine Variation des Schwellwertes für einen Schnittbildsatz. Dargestellt (Abb. 13.90) sind die Auswirkungen auf die Anzahl der detektierten Poren sowie die Porosität, die deutliche Abweichungen für die verschiedenen Schwellwerte aufweisen. Demnach zeigt nur ein manueller Abgleich durch den Bediener mit dem Originalbild auf, welcher Schwellwert der Optimale ist (hier: SW = 100). Eine individuelle Schwellwertanpassung ist daher für jeden Belag erforderlich, um die Defektstellen optimal zu erkennen

Neben den analysetechnischen Besonderheiten ist auch die Güte der Reproduzierbarkeit zu untersuchen. Hierfür erfolgten Wiederholungsmessungen eines Belages für eine Meßposition. Zwischen den Messungen wurde jeweils ein Ein- und Ausbau des Prüflings vorgenommen, um mögliche Positionierungseinflüsse aufzuzeigen. Die Einstellungen des Tomographen sind stets beibehalten worden, ebenso wie die Auswerteparameter. Bei der Betrachtung der interpolierten Kurvenverläufe der relativen Porositäten zeigt sich eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit (Abb. 13.91), wobei signifikante Einflüsse durch die

Positionierung (Ein- und Ausbau des Prüflings) nicht erkennbar sind. Unter Beibehaltung der Meß- und Analyseparameter zeigt sich demnach eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit, die verdeutlicht, daß die Methode robust ist und zuverlässig angewendet werden kann.

8.5.6 Ergebnisse

Im Rahmen der Ergebnisse erfolgt die Darstellung der Porositäten für die Belagkonzepte NAO und ECE (jeweils grüner Belag), wobei letzteres am Beispiel des ECE-kf vorgestellt wird. Zunächst sollen globale 3D Aufnahmen der Reibmatrizen betrachtet werden (Abb. 8.35).

Diese verdeutlichen als (seitenrichtige) Draufsicht die Verteilung der Porositäten, so daß sich sehr gut Parallelen zu den bisherigen Analysen der in-situ und ex-situ Untersuchungen erkennen lassen. Auslaufseitig zeigen sich für beide Beläge höhere Porositäten, welche durch größere Porenkomplexe charakterisiert werden können. Im Bereich des Einlaufs und besonders des mittleren Reibrings zeigen sich hingegen sehr wenige Defektstellen bzw. sehr stark verdichtetes Material.

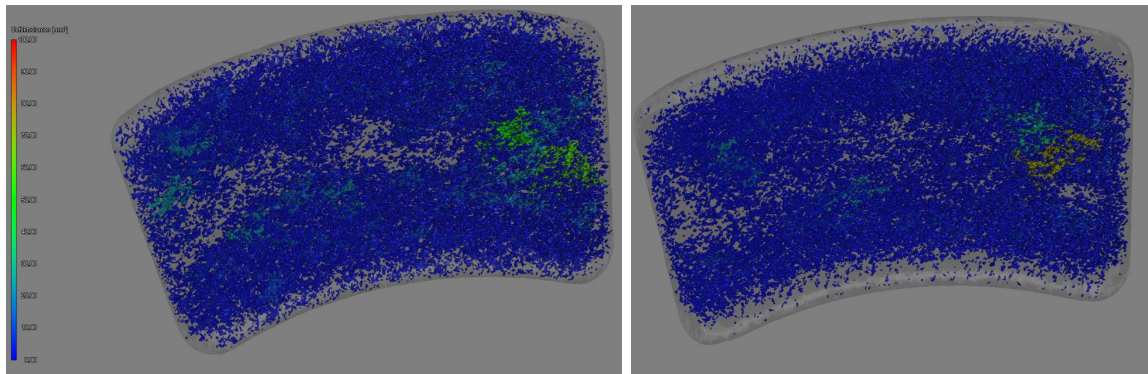


Abb. 8.35: 3D-Darstellung der Porosität für einen ECE-kf (links) und NAO (rechts)

Anhand der jeweiligen Schnittbilder wird dies unterstrichen. Der axiale Schnitt (seitenverkehrt dargestellt) beim NAO bei halber Belaghöhe verdeutlicht die höhere Porosität auslaufseitig mit auffälligen Porenkomplexen (Abb. 13.92), wobei ebenso die dichten Bereiche des mittleren Reibrings sowie im Einlauf gut zu erkennen sind. Der Übergang der Porosität vom Aus- zum Einlauf kann ebenfalls anhand eines radialen

Schnittes (Schnitt A – A) oder mindestens zweier tangentialer Schnitte (Schnitt B – B sowie C – C) bestätigt werden. Die Porositätsverteilungen des ECE-kf sind denen des NAO ähnlich und können anhand der axialen, tangentialen (Schnitte B – B und C – C) und radialen (Schnitt A – A) Schnittbilder bestätigt werden (Abb. 13.93).

Auf Basis der Schnittbilder sollen nun die Porositäten in axialer, radialer und tangentialer Ausdehnung vorgestellt werden (Abb. 8.36). Mit dieser objektiven Analyse- und Darstellungsmethode wird eine Objektivierung angestrebt, da die bisherigen Aussagen lediglich das Ergebnis subjektiver Betrachtungen der CT-Aufnahmen darstellen. Neben den interpolierten Kennlinien sind ergänzend Trendlinien (Nutzung eines Polynoms sechsten Grades) aufgeführt, die es vereinfachen sollen, die tendenziellen Verläufe zu erkennen.

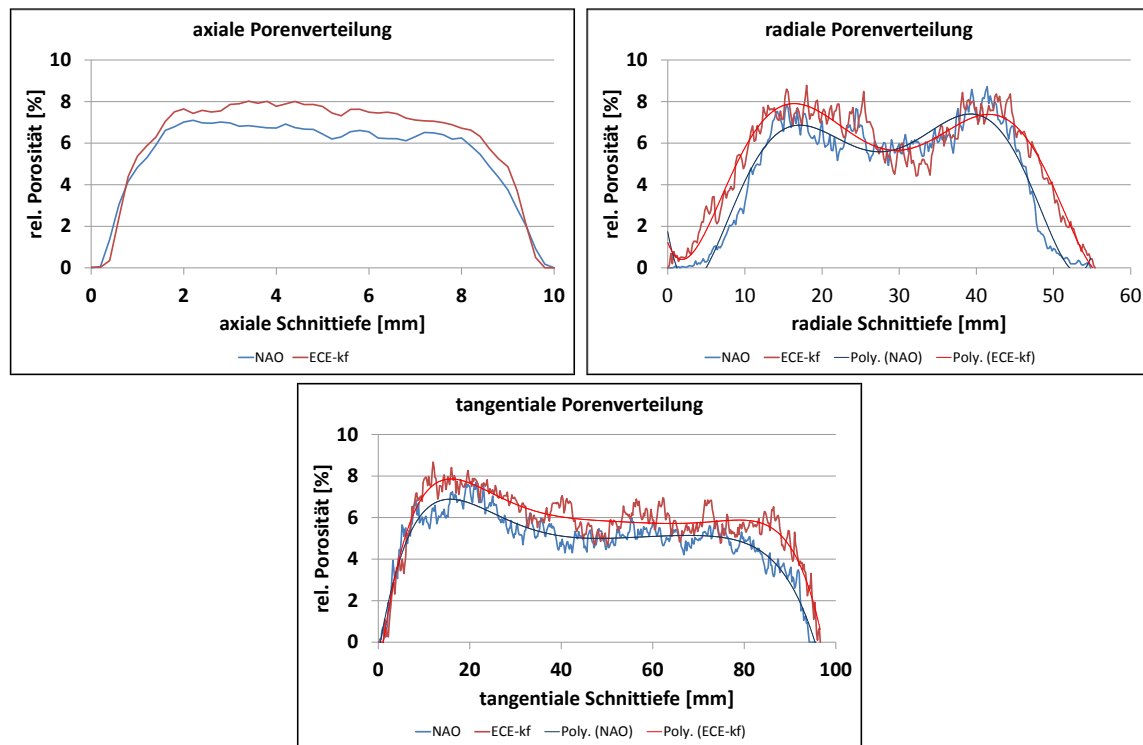


Abb. 8.36: Porositäten beider Belagkonzepte für die axiale, radiale und tangentiale Ausdehnung

Die axiale Porenverteilung zeigt keine deutlichen Auffälligkeiten beider Beläge. Das Defektstellenniveau ist, von den Randbereichen abgesehen, als

nahezu konstant zu bewerten. Anhand der Analyse der radialen Porenverteilung ist für beide Beläge gut zu erkennen, daß im Bereich des mittleren Reibrings die Porosität geringer ist. Beim NAO ist überdies zu erkennen, daß die Randbereiche weniger porös sind als die des ECE-kf. Die Kennlinien der tangentialen Porenverteilung verdeutlichen gut die erhöhte Porosität im auslaufseitigen Bereich, während sie im Bereich des Einlaufs geringer ausfällt. Im Bezug auf die Randbereiche sind zwischen NAO und ECE-kf, anders als bei der radialen Ausdehnung, keine Unterschiede zu erkennen.

Die Betrachtungen zeigen, daß für das Gesamtverständnis der Porositätsverteilung eine Betrachtung der axialen, radialen und tangentialen Ausdehnung erforderlich ist. Die vorgestellten subjektiven und objektiven Analyseansätze verdeutlichen zudem, daß es mit Hilfe der 3D Computertomographie möglich ist, die Porositätsverteilung in einer Reibmatrix zu bestimmen. Sie erweist sich als hilfreiche Methodik, den Reibpartner Reibbelag so zu charakterisieren, daß wichtige Aussagen hinsichtlich des tribologischen und physikalischen Verhaltens getroffen werden können. So finden sich Bestätigungen zu den zuvor vorgestellten in-situ Visualisierungsuntersuchungen (Naß- und Trockenreibversuche, Reibversuche zu Thermoelastischen Instabilitäten), nach denen der Einlaufbereich sowie der Bereich um den mittleren Reibring entscheidend die Reibarbeit bestimmen, während der Auslaufbereich weniger bedeutsam für die Reibkraftübertragung ist. Auch die lokalen Kompressibilitätsversuche verdeutlichen orts aufgelöste Unterschiede der Reibmatrix mit der Schlußfolgerung, die den Zusammenhang zwischen Belagsteifigkeit und Flächenpressungsverhältnissen aufzeigt, was letztlich auch bedeutet, daß Kompressibilität und Porosität zusammenhängende Eigenschaften sind. Damit erfolgt die Bestätigung, daß die lokale Steifigkeitsverteilung mit der der Porositäten korreliert und beide physikalische Eigenschaften synonym verwendet werden können. Schließlich wirkt sich dieses Verhalten auch auf die chemische und

topographische Gestalt der Belagoberfläche aus, die keinesfalls als homogen zu beschreiben sind und Unterschiede in den verschiedenen Bereichen der Reibzone aufweisen. Damit ist der Nachweis gelungen, daß das Patch- und Partikelverhalten als Ergebnis der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Reibbelages zu verstehen sind, besonders aber der lokalen Steifigkeitsverteilung. Sie ist bestimmt durch die Porosität und bestimmt selbst die Belagoberflächenchemie und -topographie erheblich mit, so daß schließlich auch das Reibverhalten davon entscheidend beeinflusst ist.

Bezüglich der tribologischen und physikalisch / chemischen Analysen läßt sich schließlich zusammenfassend für die Reibversuche konstatieren, daß charakteristische und ähnliche Temperatur- und Momentenverläufe hoher thermischer Belastungen für sämtliche untersuchten Reibpaarungen aufgezeigt werden können. Beläge mit hohen Reibwerten weisen ebenso hohe thermische Belastungen auf. Aus den REM / EDX Analysen gehen der Einfluß der Belagbestandteile (besonders der Reibwertverstärker) sowie deren Verteilung über die Belagoberfläche hervor. Diese liefern die Erklärung für die Ausprägung des globalen Reibwertes. Zudem verdeutlicht die Analyse der thermisch besonders belasteten Bereiche (wie am mittleren Reibring) die Rolle der charakteristischen belagimmanenten Bestandteile (NAO: Zirkonium und Titan, ECE-kf: Eisen, ECE-mk: Eisen und Kupfer). Die topographischen Analysen zeigen homogene Oberflächen ohne Primärplateaus beim NAO und zerklüftete und inhomogenere Oberflächen, die durch Primärplateaus geprägt sind, bei den ECE-Belägen. Dies liefert Korrelationen und Erklärungen für die Visualisierungsbeschreibungen aus Kapitel 7. Mittels der Kompressibilitäts- und Porositätsuntersuchungen ist zunächst der Nachweis der synonymen Verwendung beider physikalischer Eigenschaften gelungen. Zudem können Korrelationen der Verteilungen zu den chemischen Analysen (u.a. Bedeutung des mittleren Reibrings) erkannt sowie die Erklärung für die Bedeutung des Einlaufbereiches und mittleren Reibringes bei den

Visualisierungsbeschreibungen gegeben werden. Demnach begünstigt eine hohe Steifigkeit bzw. geringe Porosität die Kontaktsituation und läßt höhere Flächenpressungen zu.

Abschließend läßt sich festhalten, daß der Nachweis der prinzipiellen Vergleichbarkeit der Glasversuche mit klassischen Reibpaarungen Graugußbremsscheibe – organischer Reibbelag hinsichtlich der Oberflächenstrukturen (und damit Verschleißmechanismen) und dem Reibverhalten bzw. den Reibmechanismen erbracht wurde. Dies entspricht schließlich einem vergleich- und übertragbaren tribologischen Verhalten.

9 Zusammenfassung

Die in den vorangestellten Kapiteln dargelegten Ergebnisse und Erkenntnisse sollen im folgenden zusammengeführt und an den zuvor formulierten Hypothesen (Kapitel 5) gespiegelt werden, um sie, im Falle einer positiven Bestätigung, in Thesen zu überführen.

Aus der Literatur bzw. dem Stand der Technik sind bislang lediglich stark vereinfachte Prüfaufbauten und –umgebungen bekannt. Das Flexible Tribologie-Modul (FTM) stellt sich überaus flexibel dar, gewährleistet die optische Zugänglichkeit zur Reibzone und berücksichtigt nicht modifizierte Reibbeläge als Prüflinge. Als Reibpartner wurde Borosilikatglas ausgewählt, welches mechanisch und thermisch robust ist und zu vertretbaren Kosten eingesetzt werden kann. Es bietet zudem sehr gute Visualisierungsmöglichkeiten, da es relativ kratzfest ist. Die Sensorik in Form eines Hochgeschwindigkeitsmikroskops besitzt Möglichkeiten der lokalen und globalen Betrachtung der Reibzone. Zudem erlaubt eine Verstelleinrichtung die definierte Einstellung von Meßpunkten auf der Belagoberfläche. Die entwickelten Prüfprozedere wurden an die Randbedingungen des FTM angepaßt, orientieren sich an konventionellen Prüfstandards und beinhalten Bedding, Schlepp- und Stopbremsungen mit Bremsdrücken von bis zu 15 bar und Drehzahlen bis zu 500 U/min, während die gemessenen Reibzonentemperaturen maximal 250 °C betragen. Somit kann die **Hypothese I** bestätigt werden.

Es konnte gezeigt werden, daß ein Materialtransfer beider Reibpartner untereinander sowie zum dritten Reibkörper erfolgt, wie ihn Musiol, Poeste, Österle u.a. zuvor an konventionellen Reibpaarungen nachgewiesen haben. Auch mit der Vollglasscheibe (VGS) ist die reale Kontaktfläche deutlich kleiner als die nominelle. Hinsichtlich konkreter Zahlenangaben sei jedoch bemerkt, daß diese abhängig von Bremsdruck, Verschleißzustand, Kolben- / Fingerposition und –geometrie, (lokale) Kompressibilität sowie der Dickenschwankung der Scheibe (DTV) sind. Die Angabe von pauschalen Zahlenwerten wird daher als nicht korrekt

angesehen. Auch die Aussage Musiols, daß der lokale Reibwert veränderlich ist, der globale jedoch konstant, zeigt sich bei den Versuchen mit der VGS, nicht zuletzt durch die verschiedenen an der Lastübertragung befindlichen Bereiche sowie den Reibringverlagerungen.

Hinsichtlich des thermomechanischen Verhaltens können ebenfalls phasenverschobene Temperaturschwingungen und Reibringverlagerungen festgestellt werden. Dabei sind stationäre, unharmonische und harmonische (Schwingungs-)zustände der Temperatursignale zu erkennen. Zudem korreliert der Momentenverlauf mit dem dominanten Temperatursignal (höchste Temperaturwerte), wie dies auch Musiol, Kleinlein, Dörsch u.a. für konventionelle Reibpaarungen zeigten.

Die besonders aus Uppsala bekannte Theorie von Primär- und Sekundärpatches bestätigt sich bei den Glasversuchen ebenso wie die erkannten Größenverhältnisse der Patchflächen.

Auch im Rahmen von Reibcharakterisierungen zeigen sich qualitativ vergleichbare Momentenverläufe zwischen Graugußscheiben (GGS) und der VGS, was ebenso bestimmte Artefakte betrifft (Initial Bite). Jedoch sind die Auslöseparameter z.B. im Fall von Temperaturschwingungen verschieden.

Hinsichtlich der Verschleißbilder der einzelnen Belagqualitäten lassen sich ebenfalls Parallelen zu einem konventionellen Referenzsystem (Graugußscheibe, AK Master Prüfung) erkennen, speziell die Beanspruchung des mittleren Reibrings sowie die Bealgotopographie betreffend. Letztere zeigt, daß die Patches in Anzahl, Gestalt und Dimension vergleichbar sind, wie auch die Partikelbahnen bzw. -kanäle. Mit diesem Nachweis der Vergleichbarkeit der Glasversuche mit denen konventioneller Reibpaarungen ist demnach **Hypothese II** zu bestätigen.

Die **Visualisierung der Partikeldynamik** wurde mit Mitteln der Bildverarbeitung realisiert. Neben der Berücksichtigung der erforderlichen Aufnahmeparameter wurde eine Bildaufbereitung entwickelt, die die Filterung, Invertierung und Kalibrierung der Aufnahmen beinhaltet. Die

anschließende Partikeldetektion und -verfolgung stellt die Basis für die spätere Bewegungsanalyse dar und besitzt einen semi-automatischen Charakter, der die minimale detektierbare Partikelgröße auf 5 µm beschränkt. Das Partikelverhalten ist belagcharakteristisch und abhängig von der Oberflächentopographie sowie den jeweiligen Flächenpressungsverhältnissen. Homogene und geradlinige Partikelbahnen bzw. -kanäle sind vorwiegend beim NAO anzutreffen, während der ECE ebenfalls geradlinige, jedoch größtenteils verzweigte Partikelbahnen aufweist, die zu Ablenkungen der Partikelbewegungen führen. Ebenso finden sich Verjüngungen und Aufspreizungen, die die Partikelgeschwindigkeiten beeinflussen. Im Falle hoher Flächenpressungen und einer damit begünstigten Patchbildung ist festzuhalten, daß die Partikelströme und damit auch der Patchaufbau durch die großen (Medium- und Großpartikel) Partikel bestimmt sind. Die Kleinst- und Feinpartikel folgen den Größeren, begleiten diese auf den diskreten Partikelbahnen und ergänzen den Patchaufbau. Damit ist auch gezeigt, daß die aus der Literatur bekannten Partikelgrößenverteilungen eine eher untergeordnete Rolle bei der Patchbildung spielen. Mit diesen Erkenntnissen kann die **Hypothese III a)** in eine gültige These überführt werden.

Für die **Visualisierungen der Patchdynamik** sind zunächst die adäquaten Aufnahmeparameter ermittelt und berücksichtigt worden. Die Bildaufbereitung sieht die Kalibrierung und anschließende Flächenbestimmung der Patches vor, welche manuell als Polygonzugmethode oder automatisiert (schwellwertbasiert) erfolgt. Als lokale Auflösungsgrenzen sind Werte von 100 bis 150-facher Vergrößerung zu nennen, die globalen Betrachtungen (komplette Reibzone) lösen das Patchverhalten nicht ausreichend genug auf. Die Patches (Sekundärpatches) prägen sich dort aus, wo hohe Flächenpressungen vorliegen. Ist die Flächenpressung geringer, zeigen sich Überspülungen mit Partikelströmen (bestehend aus Feinstpartikeln) oder kaum

Oberflächenänderungen (geringfügiger Kontakt der beiden Reibpartner). Die Sekundärplateaus besitzen erhabene Strukturen, sind kompaktiert und verfestigt und weisen eine chemische Zusammensetzung aus beiden Reibpartnern auf. Es kann kein abrupter Zerfall festgestellt werden, wohl aber eine Zerstörung durch den an eine Stoppbremung anschließenden Drehzahlhochlauf (Schervorgang). Im Rahmen von Bremssequenzen kann gezeigt werden, daß Patches an den gleichen Positionen immer wieder erneut entstehen können, auch wenn zwischenzeitlich jedoch Bremsschritte erfolgen können, bei denen sich der Patch nicht ausbildet. Die Initialkeime (als Inhomogenitäten charakterisiert) bleiben demnach für umfangreichere Lastkollektive erhalten. Daneben sind Abhängigkeiten vom jeweiligen Belagkonzept festzustellen. Beim NAO bilden sich die Sekundärpatches an Inhomogenitäten, indem Agglomerationen, Kompaktierungen und Verfestigungen der Abriebpartikel erfolgen. Die Patches zeigen Wachstums- und Verlagerungsphasen während der Bremsung. Bei den ECE-Belägen bilden sich die Sekundärplateaus an den robusten Primärpatches aus, zudem kommt es zu Agglomerationen loser Abriebpartikel. Die Bindung an die Primärplateaus ist sehr stark, so daß keine Verlagerungen erfolgen. Mit der nachgewiesenen Möglichkeit der Visualisierung der Patchdynamik wird **Hypothese III b)** bestätigt.

Der **Funktionsnachweis einer segmentierten Graugußscheibe** (SGG) für in-situ Visualisierungsmessungen konnte erfolgreich erbracht werden. Auch konnten Partikelströme erkannt und beschrieben werden. Eine umfassende Charakterisierung ist indes aufgrund der Abmessungen der Abriebpartikel, es handelt sich um Kleinst- und Feinstpartikel, mit den gegenwärtigen Auswertemethoden nicht möglich und neue Ansätze, wie zum Beispiel Vektorfeldanalysen, sind erforderlich. Die **Hypothese IV** kann daher nicht bestätigt werden.

Hinsichtlich der **Charakterisierung der Patchdynamik** sind **hybride Scheibenkonzepte** gut geeignet. Es konnten nicht nur die Änderungen der Reibschichtgestalt während einer Bremsung dargestellt werden, sondern

auch die Unterscheidung in tragende und nicht-tragende Bereiche vorgenommen werden. Auch wurde das Wandern des Reibrings während einer Bremsung bestätigt. Somit ist **Hypothese V** in eine gültige These zu überführen.

Die Partikeldetektion im Rahmen der Versuche mit der VGS erfolgt für äquivalente Partikeldurchmesser, die größer als 5 µm ausfallen. Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine Klassifizierung in drei Partikelklassen (I – Feinstpartikel, II – Mediumpartikel (5..30 µm), III – Großpartikel (größer 31 µm)) vorgenommen. Hinsichtlich der Größenverteilung ergeben sich für den NAO die kleinsten Partikeldurchmesser, gefolgt vom ECE-kf, während der ECE-mk die größten Partikel aufweist. Dieses Ergebnis läßt sich auch anhand der Topographie, dem Reibwert bzw. -moment, und dem Eisenanteil (chemischen Zusammensetzung) erklären, wonach der NAO äußerst homogen, die niedrigsten Reibmomente und keine nennenswerten Eisenanteile aufweist. Für den ECE-kf stellen sich Werte zwischen NAO und ECE-mk ein, während letzterer eine inhomogenere Struktur besitzt, die gegen Glas die höchsten Reibmomente und den höchsten Eisenanteil aufweist.

Das **Bewegungsverhalten der Partikel** wird in Geschwindigkeits- und Zeitverhalten untergliedert. Bei ersterem zeigt der NAO höhere maximale und mittlere Partikelgeschwindigkeiten als die ECE-Beläge und ein zur Relativgeschwindigkeit proportionales Verhalten. Bei den ECE-Belägen sind direkte Korrelationen zur Relativgeschwindigkeit aufgrund der Belagtopographie nur schwer zu erkennen. Verzweigte Partikelkanäle überwiegen gegenüber der Reibgeschwindigkeit in ihrem Einfluß auf die Partikelgeschwindigkeit. In Bezug auf das Zeitverhalten zeigen alle Beläge eine Proportionalität der Bewegungs- und Standzeiten zur Relativgeschwindigkeit (steigende Bewegungsanteile, sinkende Standanteile bei steigender Drehzahl). Die Bewegungszeiten für NAO und ECE sind annähernd gleich, während die Standzeiten des NAO größer als bei den ECE ausfallen. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die

Partikelgeschwindigkeiten deutlich geringer im Vergleich zu den Relativgeschwindigkeiten ausfallen. Hierbei wurde erkannt, daß die Groß- und Mediapartikel sich zwar schneller als die Feinstpartikel bewegen, ihre Geschwindigkeitsniveaus jedoch einigermaßen vergleichbar sind. Mit dem Nachweis der Charakterisierbarkeit der Partikeldynamik bestätigt sich auch **Hypothese VI a)**.

Aus lokalen Untersuchungen zeigt sich die **Patchdynamik** abhängig vom Belagkonzept. Das Initialverhalten kann bestimmt werden und zeigt, daß nach ca. einer Sekunde Bremsdauer die Sekundärpatches etabliert sind. Für den NAO kann festgestellt werden, daß er eine höhere Initialdynamik als die ECE-Beläge besitzt (innerhalb von 0,01 s bildet sich die Grundstruktur des Patches!). Mit dem Initialverhalten bestimmt sich auch die Charakteristik des Sekundärplateaus. Es werden drei Patchklassen erkannt und unterschieden. Die starken Sekundärpatches besitzen ein deutliches, schnelles initiales Patchwachstum und zeigen im weiteren einen Flächenzuwachs (obgleich bei deutlich geringerer Dynamik und ein degressives Verhalten aufweisend) bis zum Ende der Bremsung. Die schwachen Sekundärplateaus verharren nach geringerem Wachstum in der Initialphase auf einem niedrigeren Niveau und bauen sich zum Teil sogar ab. Schließlich weisen die instabilen Sekundärpatches, welche zumeist beim ECE-kf auftreten, ebenfalls geringere Patchflächenniveaus und zudem deutliche Schwankungen auf. Auch wird eine, insbesondere beim ECE-kf, gegenseitige Patchbeeinflussung, die Veränderungen während der Bremsungen erfährt und bedingt durch die Topographiecharakteristik ist, erkannt. Bei den ECE zeigen sich kleinere Patchflächen, speziell beim ECE-kf, während der NAO die größten Patches aufweist. Korrelationen zum globalen Reibverhalten sind aufgrund der lokalen Einzelanalysen nicht eindeutig möglich. Im Rahmen der Belagrasterung (lokale Analysen unter globalem Bezug) zeigt sich die Patchdynamik abhängig von den lokalen Flächenpressungsverhältnissen: Sekundärpatches treten nur dort auf, wo hohe Flächenpressungen vorliegen und sich Partikel an Inhomogenitäten

oder Primärpatches anlagern können. Fällt die Flächenpressung geringer aus, werden diese Initialkeime überspült mit Partikeln, deren mittlere Geschwindigkeiten durch die verschlechterte Kontaktsituation mit der Scheibe sinken. Da die Patchdynamik mit den entwickelten Methoden erfolgreich charakterisiert werden, kann die **Hypothese VI b)** in eine gültige These überführt werden.

Mit dieser Bestätigung der Charakterisierbarkeit der Patch- und Partikeldynamik hat sich auch gezeigt, daß die Sekundärpatchflächenanteile deutlich kleiner als die der Abriebpartikel (lose und als Partikelstrom) ausfallen. Globale Reibzonenbetrachtungen haben gezeigt, daß die Reibschicht nur zu maximal zirka 5 % aus Sekundärpatches besteht, während die übrigen 95 % durch die Partikel (alle Partikelklassen berücksichtigend) repräsentiert werden.

Aus den lokalen Untersuchungen mit globalem Bezug (Belagrasterung) kann erkannt werden, daß die losen Partikelströme bei Stoppbremungen gut mit dem Momentenverlauf korrelieren, bei Schlepfbremungen indes verhalten sie sich gegenläufig. Eine eindeutige Korrelation der lokalen Partikeldynamik zu globalen Betriebsparametern wird daher nicht festgestellt, was die **Hypothese VII a)** widerlegt.

Im Rahmen der globalen Analysen zeigen indes die losen Partikelströme ein den Momentenverläufen vergleichbares (proportionales) Verhalten und demnach eine gute Korrelation. Somit wird geschlußfolgert, daß sehr intensiv ausgeprägte lose Partikelströme zu einem hohen Bremsmoment beitragen und über sie Momentenverläufe beeinflußt werden können. Dies bestätigt nicht nur die Notwendigkeit von globalen Reibzonenbetrachtungen im Hinblick auf das globale Reibverhalten, sondern auch, daß die genutzten Analyseansätze für Partikel(strom)dynamiken zielführend sind.

Die **Analysen der lokalen Patchdynamik** haben bezüglich der zugehörigen Reibmomentenverläufe keine eindeutigen Korrelationen aufgezeigt. Bei der Umsetzung der Belagrasterung fällt bei Stoppbremungen die Summe der

Flächen aller Sekundärpatches zum Ende der Bremsung, während das Moment leicht zunimmt. Begründet wird dies mit der sinkenden Relativgeschwindigkeit, die die Patchbildung erschwert. Bei Schleppbremsungen nehmen die Sekundärplateaus mit der Bremsungsdauer ab, auch das Moment fällt leicht. Eindeutige Korrelationen sind somit auch in diesem Fall nicht erkennbar, was die **Hypothese VII b)** widerlegt.

Werden indes globale Untersuchungen berücksichtigt, zeigt sich für Stop- und Schleppbremsungen ein gegensinniges Verhalten von Patchfläche und Moment, da die erhabenen Sekundärpatches die reale Kontaktfläche verringern. Zum Ende der Schleppbremsung stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem Moment und Plateauausprägung konstant sind. Damit zeigt sich, daß Korrelationen vorliegen, jedoch auch, daß die Sekundärpatches nicht für ein hohes Reibmoment verantwortlich zeichnen.

Ist die Zielstellung bei der Gestaltung von Reibbelägen ein möglichst hoher Reibwert, so sind zunächst die optimalen Flächenpressungsverhältnisse mit dem Reibpartner zu berücksichtigen. Im untersuchten Fall ist der mittlere Reibring für die maximale Reibkraftübertragung verantwortlich, was nicht zuletzt durch die Naßversuche und Betrachtungen zu Thermoelastischen Instabilitäten aufgezeigt wurde. Im weiteren sollte die Ausprägung von Sekundärpatches, besonders im lasttragenden Reibringbereich (hier: mittlerer Reibring), vermieden werden. Stattdessen sollen die losen Partikelströme, die mit dem Momenten- bzw. Reibwertverlauf korrelieren, an der Agglomeration und Kompaktierung gehindert werden und sich möglichst ungehindert durch die Reibzone bewegen können.

Hinsichtlich des Naßverhaltens korrelieren die benetzten Anteile gut mit dem Abfall im Momentensignal. Die Abtrocknung erfolgt in 2 Phasen. Zunächst trocknet der mittlere Reibring ab, der zugleich die höchste Flächenpressung aufweist. Anschließend stellt sich die Abtrocknung der restlichen Reibzone (vom Einlauf in Richtung Auslauf) ein. Dabei ist auffällig, daß bereits ca. 40 % der nominellen Reibzonenfläche für ein

erholtes Reibmoment ausreichend sind. Für Stopbremsungen ist die Dynamik der Initialphase der Benetzung bestimmbar, zudem zeigen sich deutliche stick-slip Phänomene zum Ende der Bremsung. Es kann festgehalten werden, daß die Kombination aus der Bestimmung realer Kontaktflächen und Naß- bzw. Trockenanteilen gut mit dem globalen Reibmoment korreliert.

Die **Analysen von Momentenüberhöhungen** (Initial Bite) zu Beginn einer Bremsung haben gezeigt, daß die Ausprägung der Reibschicht bzw. Patches entscheidend für das Auftreten solcher Artefakte ist. Zum einen konnte nachgewiesen werden, daß eine etablierte Patchstruktur benötigt wird, da bei grünen Reibpartnern kein Initial Bite festzustellen war. Zum anderen ist auch die Dynamik der Patchausprägung zu Beginn der Bremsung relevant. Fällt sie hoch aus, wie an einem NAO-Belag demonstriert, stellt sich ein Initial Bite ein, wohingegen es bei einer geringeren Patchdynamik (an beiden ECE-Belagkonzepten gezeigt) ausbleibt. Damit bestätigt sich **Hypothese VIII** und kann in eine These überführt werden.

Besonders gut geeignet für Untersuchungen hinsichtlich von **Reibringverlagerungen** haben sich Schleppbremsungen erwiesen, da ihr zeitlicher Umfang ausreichend groß gewählt werden kann, um die Wirkmechanismen umfassend zu charakterisieren. Hierbei wurden Einzelbildaufnahmen erstellt, die das Verhalten der Thermoelastischen Instabilitäten (TEI) bzw. Hitzeflecken für die komplette Reibzone beschreiben können. Durch diese können der Typ der TEI (im vorliegenden Fall Typ IV) und die Anzahl der Hitzeflecken in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf, dem Momentensignal sowie den Temperaturverläufen bestimmt werden.

Es wurde der Nachweis erbracht, daß das mittlere Temperatursignal im qualitativen Verlauf gut mit dem Reibmoment übereinstimmt, der äußere Reibring schwingt phasenverschoben um 180°. Die Hitzeflecken bilden sich im Einlaufbereich (tangential) aus und erreichen ihr Maximum im Bereich

des mittleren Reibradius (radial). Dieses fällt mit dem Maximum von Moment und mittleren Temperatursignal zusammen.

Die TEI sind als periodische Phänomene zu charakterisieren und weisen ein harmonisches Schwingungsverhalten auf. Bemerkenswert sei dabei, daß aus den jeweiligen Einzelbildaufnahmen der Reibzone mittels Spiegelreflexkamera zu erkennen ist, daß sich teilweise an denselben Asperitkontakten periodisch Hitzeflecken bilden, was die Robustheit der Kontakte (Primärpatches) gegenüber einer thermischen Überbelastung sowie die Wiederholgenauigkeit dieses Reibphänomens demonstriert und Theorien widerlegt, nach denen Asperiten durch die erste thermische Überbelastung aus der Reibmatrix herausgerissen werden. Mit diesen Ergebnissen läßt sich die **Hypothese IX** bestätigen.

Die Vollglasscheibe erlaubt den vollständigen Einblick in die Reibzone, während die thermische und mechanische Robustheit in Bezug auf die für die TEI-Untersuchungen erforderlichen Betriebsparameter gegeben sind. Durch die Nutzung des FTM ist die optische Zugänglichkeit der Bildsensorik gewährleistet und zudem möglich, die erforderlichen Betriebsparameter einzustellen sowie die globalen Reibparameter zu erfassen. Die Verwendung einer digitalen Spiegelreflexkamera gestattet es, Einzelaufnahmen in kurzer zeitlicher Abfolge, auch unter extremen Lichtverhältnissen (Abdunklung), vorzunehmen. Durch diese Möglichkeiten können nicht nur Thermoelastische Instabilitäten reproduziert, sondern auch hochaufgelöst erfaßt werden, was schließlich **Hypothese X** bestätigt.

Die **ortsaufgelösten physikalischen und chemischen Analysen** haben gezeigt, daß moderate Vergrößerungen (30-fach) für REM / EDX Analysen am besten geeignet sind, um die Gestalt und chemische Zusammensetzung so zu bestimmen, daß der Einfluß bestimmter Belagbestandteile (wie z.B. Eisenspäne) nicht zu groß und unrealistisch wird. Bereiche, die wesentlich an der Reibkraftübertragung beteiligt sind, können detailliert untersucht und mit den übrigen Reibzonenbereichen verglichen werden. Dabei zeigen sich besonders für den mittleren Reibringbereich in Form einer gut

erkennbaren Schwarzfärbung Auffälligkeiten. Während der NAO in jenem Bereich erhöhte Zirkonium- und Titananteile aufweist, die mit einem erhöhten Reibwert und gesteigerter Temperaturstabilität in Verbindung zu bringen sind, wies der ECE-kf einen erhöhten Kohlenstoffanteil auf, wobei sich der Eisenanteil relativ homogen verhält. Für den ECE-mk indes zeigte sich in jenem Bereich ein erhöhter Kohlenstoffanteil, während Kupfer homogen verteilt ist und der Eisenanteil sogar geringfügig geringer ausfällt. Allen drei Belagkonzepten ist jedoch der erhöhte Sauerstoff- und Siliziumanteil gemein, der auf SiO_2 schließen läßt. Nicht zuletzt dieses erklärt die verbesserte Kraftübertragung im Vergleich zu den übrigen Bereichen der Reibzone.

Die belagspezifischen Eigenschaften in Form eines Belagfingerprints sollen am Beispiel des NAO zusammengefaßt werden. Als Ergebnis der chemischen Analysen zeigt sich eine sehr homogene Elementverteilung über den kompletten Belag. Mittels REM wurde auch die Flächenstruktur als homogen charakterisiert, ebenso wie die topographische Struktur (sowohl flächig, die radiale bzw. tangentiale Ausdehnung betreffend, als auch hinsichtlich der Höhe, die axiale Ausdehnung berücksichtigend). Mit diesen Erkenntnissen lassen sich schließlich die geradlinigen Partikelbahnen, hohen Partikelgeschwindigkeiten sowie die Ausprägung starker Sekundärpatches erklären, die das belagcharakteristische und – eigene Reibverhalten begründen (wie das dynamische Initialverhalten, das sich als Initial Bite äußert). Mit diesen Ergebnissen zeigt sich eine Bestätigung der **Hypothese XI**.

Im Rahmen der **Kompressibilitätsuntersuchungen** erwiesen sich drei Betätigungszyklen als zielführend, wobei sich nach dem ersten bereits das finale Setzverhalten einstellte. Der Nachweis lokaler Steifigkeitsunterschiede wurde für die verschiedenen Belagkonzepte erbracht. Als dessen Ergebnis wird festgestellt, daß der mittlere Reibring (tangential) und Einlaufbereich (radial) die höchsten Steifigkeiten aufweisen.

Der Auslaufbereich indes zeigt die geringsten Steifigkeiten. Somit ist die **Hypothese XII** in eine gültige These zu überführen.

Mit Hilfe des durchstrahlenden, bildgebenden Verfahrens der Computertomographie konnten die verschiedenen Belagkonzepte hinsichtlich ihrer **Porositätsverteilungen** erfolgreich charakterisiert werden. Die Ergebnisse erlauben nicht nur die Schlußfolgerung, die Steifigkeitsverteilung (aus den Kompressibilitätsmessungen) und die der Porositäten synonym zu verwenden, sondern zeigen auch die charakteristischen lokalen Besonderheiten und Unterschiede der Reibmatrizen hinsichtlich der Defektstellenverteilung in axialer, radialer und tangentialer Richtung, was schließlich die **Hypothese XIII** bestätigt.

Die Steifigkeitsverteilung korreliert sehr gut mit den Erkenntnissen aus der Belagrasterung und den globalen Betrachtungen, bei denen erkannt wurde, daß der Einlauf und mittlere Reibring die Kraftübertragung dominieren und der Auslauf sich nur schwach beteiligt. Der konkrete Nachweis erfolgte durch die Benetzungsversuche, Thermoelastischen Instabilitätsanalysen und orts aufgelösten EDX-Bestimmungen. Die Bereiche hoher Steifigkeit weisen demnach einen guten Kontakt (hohe Flächenpressung) mit dem Reibpartner auf. Somit bestätigt sich schließlich auch **Hypothese XIV** als gültig.

In Bezug auf die **allgemeingültigen Reibmodelle** der Festkörperreibung, die in Kapitel 3.1 vorgestellt wurden, hat sich das Bowden-Tabor-Modell als zielführend erwiesen. Die Theorie der Oberflächengestalt als Täler und Spitzen, welche plastisch verformt (abgetragen) werden und die realen Kontaktflächen darstellen, kann bestätigt werden. Für die Berechnung des Reibwertes bietet die Visualisierungsmethode die Möglichkeit, die realen Kontaktflächen zu bestimmen und somit eine Parametrisierung vorzunehmen. Die Ermittlung der jeweiligen Scherspannungen ist indes durch ex-situ Untersuchungen zu ergänzen.

Auch die **bremsenspezifischen Modellvorstellungen** der Gruppe um Professor Severin (u.a. durch Musiol in [5] vorgestellt) können bestätigt

werden. Reibkraftübertragende Bereiche werden nach thermischen Überbelastungen geschädigt. Jedoch haben die vorliegenden Untersuchungen gezeigt, daß dies nicht zwingend für die erste thermische Überbelastung erfolgen muß, sondern dieselben Asperitkontakte über mehrere Zyklen existieren können. Die periodische Belastung führt demnach nicht mit jedem thermomechanischen Maximum zu einer Gleichheit von Grenz- und Reibschubspannung, was gleichbedeutend mit einem Schädigungsprozeß wäre.

Bestätigung finden prinzipiell auch die Theorien der Gruppe um Professor Jacobson, wonach die Reibzone durch Primär- und Sekundärpatches geprägt ist und die realen Kontaktflächen deutlich geringer ausfallen als die Nominellen. Die Charakterisierung eines NAO-Belagkonzeptes hat in Erweiterung der bestehenden Theorien gezeigt, daß nicht zwingend harte und äußerst robuste Primärplateaus (wie Eisenspäne) für die Ausprägung von Sekundärpatches erforderlich sind, sondern auch weniger stabile und große Inhomogenitäten ausreichen. Eine Erweiterung stellen ebenso die Erkenntnisse für Reibzonenbereiche mit geringerer Flächenpressung dar, bei denen auch die erhabeneren Bereiche wie Primärpatches von Partikeln überströmt werden. Aufgrund der kleinen betrachteten Reibzonenausschnitte und kompakten Probenabmessungen konnte die Gruppe um Professor Jacobson lediglich Bereiche hoher Flächenpressungsverhältnisse untersuchen, lokale Unterschiede sowie Flächenpressungsverlagerungen sind erst durch die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden möglich zu charakterisieren.

Die dynamischen Reibgesetze der Gruppe um Professor Ostermeyer können durch die vorgestellte Methodik zukünftig noch besser parametrisiert werden. Insbesondere die reale Kontaktfläche, die bislang lediglich als Patchfläche beschrieben wird, sollte um die Fläche der Abriebpartikelströme, die eine gute Korrelation zum globalen Reibmoment aufzeigen, ergänzt werden, um damit die Beschreibung der Reibschicht zu komplettieren. Auch ist es möglich, daß die mittleren Patchtemperaturen

in-situ zukünftig durch pyrometrische Verfahren bestimmt werden. Ebenso können die Partikelgeschwindigkeiten nun dezidiert für verschiedene Reibzonenbereiche, für die verschiedene Flächenpressungsverhältnisse vorliegen, ermittelt werden. Eine wie bislang genutzte pauschale Verwendung der Hälfte der Bremsscheibendrehzahl ist damit obsolet. Die Aussagen von Graf (u.a. in [24]), nach denen innerhalb von 40 Sekunden Reibringverlagerungen auftreten und innerhalb von mehreren Minuten vollständig abgeschlossen sind, können mit den vorliegenden Ergebnissen bereits jetzt bestätigt werden und ließen sich zukünftig auf die Reibzone erweitern.

Damit können die vorgestellten Möglichkeiten zur Analyse von Reibpaarungen im allgemeinen hinsichtlich tribologischer, physikalischer und chemischer Eigenschaften einen „Belagfingerprint“ und im Besonderen einen Beitrag als Unterstützung bei der Auswahl von Reibbelagmaterialien bzw. –rezepturen liefern.

10 Ausblick

Die vorgestellten Methoden wurden bereits erfolgreich auf die Themenkomplexe Reibverhalten (trocken sowie naß) und thermisches Verhalten (Thermoelastische Instabilitäten) angewendet. Ein großes Potential wird aber auch im Kontext zu NVH-Fragestellungen gesehen, da die Partikel- und besonders Patchdynamik als maßgeblich für reibinduzierte Komfortprobleme wie Rubbeln oder Quietschen erachtet und angesehen werden. Verschiedene simulative bzw. modellhafte Ansätze (hervorzuheben sind die Arbeiten der Gruppe um Professor Ostermeyer, TU Braunschweig) sehen in synchronisierten Patchschwingungen einen wesentlichen Grund für die Anfachung der Systeminstabilitäten, die im engen Kontext mit Bremsgeräuschen stehen. Die vorgestellte in-situ Methode kann dazu beitragen, diese Vorstellungen und Modelle zu bestätigen bzw. verifizieren und einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die dynamischen Wirkmechanismen während des Auftretens hochfrequenter Störerscheinungen zu erkennen, beschreiben und zu verstehen, um gezielt Gegenmaßnahmen auf tribologischer Ebene vornehmen zu können.

Eine mögliche Erweiterung der in-situ Untersuchungsmethodik wird in der Betrachtung von Reibfilmen (zur Komplettierung der Charakterisierung des dritten Reibkörpers) gesehen, deren Vorgänge und Phänomene in der Nano-Skala zu beschreiben sind und die bislang ausschließlich ex-situ vorgenommen werden konnten. Daraus ließen sich ebenfalls Erweiterungen der Erfassung der Partikeldynamik ableiten. Nanoskalige Partikel könnten demnach mit einer höheren Auflösung und Genauigkeit erfaßt werden und den bestehenden Analysemethoden zugeführt werden. Aber auch die Partikelanalysemethodik kann durch die analytische Bestimmung der Geschwindigkeitsvektorfelder mächtiger Partikelströme ergänzt werden, was insofern reizvoll ist, als daß sie auf bereits bestehende Meßdaten angewendet werden und den betrachteten Partikeldurchmesserbereich erweitern könnte. Erste Versuche wurden bereits erfolgreich unternommen und liefern den Funktionsnachweis für

diese Methode. In Bezug auf die Betrachtungen zum Naßreibverhalten wird vorgeschlagen, die Gestaltung der Belageinlaufgeometrie durch z.B. Chamfervariationen (ohne, mit – gerade, schräg) weiterführend zu untersuchen. Der sich bildende Wasserkeil beeinflusst das Benetzungs- und damit Reibverhalten nachhaltig, wird jedoch durch die Chamfergeometrie selbst wesentlich bestimmt.

Das entwickelte hybride Scheibenkonzept der segmentierten Bremsscheibe (SGG) hat sich während der vorgestellten Grundsatzuntersuchungen als funktionstüchtig erwiesen, so daß weitergehende Untersuchungen wünschenswert sind, um den Wert der Methode insbesondere für ausgewählte Phänomene zu unterstreichen. Vor dem Hintergrund von Patchanalysen ist es besonders die Thematik Metal Pick Up (MPU), welche erstmals in-situ untersucht werden kann. Aufgrund des Metalleintrags in den Reibbelag sind Ansätze mit Vollglasscheiben nicht zielführend, die SGG hingegen besitzt einen überwiegend aus Grauguß bestehenden Reibring und gleichzeitig die Möglichkeit, mit Hilfe der Glassegmente die Reibzone beobachten zu können.

Abschließend sei der Begriff des Belagfingerprints angeführt, bei dem es um eine eindeutige Bestimmung und Zuweisung von Eigenschaftswerten geht, um einen Reibbelag in seinem komplexen Verhalten zu charakterisieren und identifizieren zu können. Die vorgestellten Methoden sind in ihren umfassenden Ausführungen gewiß zu umfangreich, arbeits- und zeitintensiv, um einen Belagfingerprint effizient zu erstellen. Auszüge wie die Ermittlung der dreidimensionalen Porositätsverteilung, eine lokale Kompressibilitätsprüfung oder auch orts aufgelöste REM / EDX Analysen nach gelaufenen Standardprüfungen wie AK Master oder SAE J 2521 könnten jedoch ebenso wie in ihrem Umfang reduzierte in-situ Versuche Bestandteil eines Prüfkatalogs für Reibbeläge sein.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Gesellschaft für Tribologie e.V., <http://www.gft-ev.de/tribologie.htm>, Aufruf vom 01.10.2013
- [2] Bowden, F.P.; Tabor, D.: *The friction and lubrication of solids*, Clarendon Press, Oxford, 1986
- [3] Czichos, H.; Habig, K.-H.: *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*, Vieweg + Teubner Verlag, 3. Auflage, Wiesbaden, 2010
- [4] Popov, V.: *Kontaktmechanik und Reibung*, Springer Verlag, 2. Auflage, Berlin, 2010
- [5] Musiol, Feliks: *Erklärung der Vorgänge in der Kontaktzone von trockenlaufenden Reibpaarungen über gesetzmäßig auftretende Phänomene im Reibprozeß*, Dissertationsschrift, Fachbereich Maschinenbau und Produktionstechnik, TU Berlin, Berlin, 1994
- [6] Poeste, Tobias: *Untersuchungen zu reibinduzierten Veränderungen der Mikrostruktur und Eigenspannungen im System Bremse*, Dissertationsschrift, Fakultät III – Prozeßwissenschaften, TU Berlin, Berlin, 2005
- [7] Eriksson, Mikael: *Friction and Contact Phenomena of Disc Brakes Related to Squeal*, Dissertationsschrift, Faculty of Science and Technology 537, University of Uppsala, Uppsala, 2000
- [8] Jacobson, Staffan; Eriksson, Mikael; Lord, John: *Wear and contact conditions of brake pads: dynamical in situ studies of pad on glass* – In: wear 249, S. 272-278, Elsevier Science B.V., 2001

- [9] Jacobson, Staffan; Eriksson, Mikael; Bergman, Filip: *On the nature of tribological contact in automotive brakes* – In: wear 252, S. 26-36, Elsevier Science B.V., 2001
- [10] Sherif, H.A.: *Investigation on effect of surface topography of pad/disc assembly on squeal generation* – In: wear 257 (2004) S. 687-695, Elsevier Science B.V., 2004
- [11] Zum Gahr, K.-H.; Voelker, K.: *Friction and wear of SiC fiber-reinforced borosilicate glass mated to steel* – In: wear 225-229 (1999) S. 885-895, Elsevier Science B.V., 1999
- [12] Bode, Kai Henning: *Wärme und wärmeinduzierte Effekte in Reibmaterialien*, Dissertationsschrift, Institut für Dynamik und Schwingungen, Technische Universität Braunschweig, Shaker Verlag, 2012
- [13] Müller, Michael; Ostermeyer, Georg-Peter; Graf, Matthias: *Towards an Explicit Computation of Wear in Brake Materials* – In: 27th SAE Brake Colloquium Proceedings, SAE 2009-01-3048, Tampa (FL), 2009
- [14] Ostermeyer, Georg-Peter; Bode, Kai; Stühler, Gregor; Stenkamp, Axel; Elvenkemper, Andreas: *Tribological Aspects of Carbon Ceramics and Cast-Iron Brake Rotors with Organic Pad Materials in Simulation and Measurement* – In: 27th SAE Brake Colloquium Proceedings, SAE 2009-01-3010, Tampa (FL), 2009

- [15] Ostermeyer, Georg-Peter: *Dynamic Friction Laws and their Impact on Friction Induced Vibrations* – In: 28th SAE Brake Colloquium Proceedings, SAE 2010-01-1717, Phoenix (AZ), 2010
- [16] Severin, D.; Dörsch, S.: *Friction mechanism in industrial brakes* – In: wear 249 (2001) S. 771-779, Elsevier Science B.V., 2001
- [17] Dörsch, S.: *Periodische Veränderung lokaler Kontaktgrößen in Reibpaarungen trockenlaufender Bremsen*, Dissertationsschrift, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 372, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004
- [18] Kleinlein, C.: *Beschreibung von Reibpaarungen in trocken laufenden Kupplungen und Bremsen durch ihre globalen und lokalen Reibungs- und Verschleißseigenschaften*, Dissertationsschrift, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 388, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006
- [19] Severin, D.; Kleinlein, C.: *Beziehung zwischen den Vorgängen in der Kontaktfläche von Reibpaarungen und deren Verhalten im praktischen Betrieb* – In: VDI Berichte Nr. 1786, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003
- [20] Ostermeyer, G.-P.; Graf, M.: *Hot Banding with oscillating radii: models including wear and temperature* – In: EuroBrake 2012 Proceedings, EB2012-IFD-04, Dresden, 2012
- [21] Augsburg, K.: *Vorlesungsreihe Kraftfahrzeugbremssysteme*, TU Ilmenau, Ilmenau, 2012

- [22] Sardá, A.; Seipel, G.; Winner, H.; Semsch, M.: *Wirkungskette der Entstehung von Hot Spots und Heißrubbeln in Scheibenbremsen* – In: XXVIII. Internationales μ -Symposium, 24. Oktober 2008, Bad Neuenahr, 2008
- [23] Bruns, R.; Steffen, T.: *Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben* – In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Ausgabe Nr.: 1998-06, 1998
- [24] Ostermeyer, Georg-Peter; Graf, Matthias: *Mode coupling instabilities induced by a periodic coefficient of friction* – In: 28th SAE Brake Colloquium Proceedings, SAE 2010-01-1687, Phoenix (AZ), 2010
- [25] Ostermeyer, Georg-Peter; Bode, Kai: *Spatially Resolved Temperatures in Inhomogeneous and Continuously Changing Disk Brake Interfaces* – In: 29th SAE Brake Colloquium Proceedings, SAE 2011-01-2347, New Orleans (LA), 2011
- [26] Österle, Werner; Urban, Ingrid: *Characterization of the up to date brake friction materials* – In: Braking and Chassis Control, 2005
- [27] Österle, Werner; Urban, Ingrid: *Friction layers and friction films on PMC brake pads* – In: wear 257, S. 215-226, Elsevier Science B.V., 2003
- [28] Österle, W.; Kloß, H.; Urban, I.; Dmitriev, A.I.: *Towards a better understanding of brake friction materials* – In: wear 263, S. 1189-1201, Elsevier Science B.V., 2007

- [29] Österle, Werner; Griepentrog, Michael; Gross, Thomas; Urban, Ingrid: *Chemical and microstructural changes induced by friction and wear of brakes* – In: *wear* 251, S. 1469-1476, Elsevier Science B.V., 2001
- [30] Österle, W.; Urban, I.; Gesetzke, W.; Rooch, H.: *Characterization and Evaluation of the Formation of Friction Layers During Braking With Conventional PMC Friction Material Against a Cast Iron Rotor* – In: 14th International Colloquium Tribology, Stuttgart, 2004
- [31] Österle, W.: *Investigation of the surface film nanostructure and assessment of its impact on friction force stabilization during automotive braking* – In: *International Journal of Material Research*, volume 101, S. 669-675, 2010
- [32] Desplanques, Y.; Degallaix, G.: *Genesis of the Third-Body at the Pad-Disc-Interface: Case Study of Sintered Metal Matrix Composite Lining Material* – In: 27th SAE Brake Colloquium Proceedings, SAE 2009-01-3053, Tampa, 2009
- [33] Giese, Andreas: *Report about European Activities on Compressibility* – In: Panel Discussion “Testing”, 29th SAE Brake Colloquium, New Orleans, 2011
- [34] Grochowicz, Jarek: *Compressibility* – In: Panel Discussion “Testing”, 29th SAE Brake Colloquium, New Orleans, 2011
- [35] Yamane, Takeshi: *Compressibility Value* – In: Panel Discussion “Testing”, 29th SAE Brake Colloquium, New Orleans, 2011

- [36] Sasaki, Yosuke; Kaido, Masataka: *Harmonization Activities on ISO and JIS Standards (Compressibility) for Brake Linings in Japan* – In: 19th SAE Brake Colloquium Proceedings, SAE 2001-01-3152, New Orleans, 2011
- [37] ISO 6310:2009: *Road Vehicles – Brake Lining – Compressive Strain Test Method*, ISO International Standard, 2009
- [38] SAE J2468:2006: *Road Vehicles – Brake Linings – Compressibility Test Procedure*, SAE International, 2006
- [39] JIS D4413:2005: *Automotive Parts – Brake Lining and Brake Pads – Compressive Strain Test Method*, JIS Japanese Industrial Standard, 2005
- [40] SAE J2725: *Road Vehicles – Friction Materials – Elastic Properties Measurements*, SAE International, 2006
- [41] Augsburg et al.: *Comparison between different investigation methods of quasi-static and dynamic brake pad behaviour* – In: 21st SAE Brake Colloquium Proceedings, SAE 2003-01-3340, Hollywood (FLA), 2003
- [42] Nishizawa et. al.: *Influence of Pad Wear on Pad Dynamic Stiffness* – In: Eurobrake Proceedings, EB2012-NVH-04, Dresden, 2012
- [43] Agueldo et. al.: *Improvements to Laboratory Compressibility Measurements and New Application Areas* – In: Eurobrake Proceedings, EB2012-TM-19, Dresden, 2012

- [44] Lowell, S.; Shields, J.E.; Thomas, M.A.; Thommes, M.: *Characterization of porous solids and powder: surface area, pore size, density*, ISBN-10: 1402023022, Springer, 2004
- [45] Giesche, Herbert: *Mercury Porosimetry: A General (Practical) Overview*, DOI: 10.1002/ppsc.200601009, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, 2006
- [46] Schadewald, Uwe: *Dichtebestimmung – GLW 3*, Vorlesungsunterlagen Werkstoffwissenschaften, Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Anorganische-nichtmetallische Werkstoffe, Ilmenau, 2012
- [47] DIN EN 623-2 : 1993: *Monolithische Keramik – Allgemeine und strukturelle Eigenschaften, Teil 2: Bestimmung von Dichte und Porosität*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1993
- [48] Johannsen, Karsten: *Kombination von Ergebnissen unterschiedlicher Verfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung*, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 1996
- [49] JIS D 4418: *Test procedure of porosity for brake linings and pads of automobiles*, JIS Japanese Industrial Standard, 1996
- [50] Inada, Kosuke; Aki, Minoru; Yamamoto, Yoshinori: *Relationship Between Powder Properties of Titanate Compounds and Brake Performance – In: 23rd SAE Brake Colloquium Proceedings*, SAE 2005-01-3925, Orlando (FLA), 2005

- [51] Langhof, Nico; Alber-Laukant, Bettina; Greuel, Christian; Hilpert, Martin; Kozub, Alexander; Voigt, Rebecca; Krenkel, Walter: *Fiber reinforced ceramic friction pads for automotive applications – The dependence of friction and wear on speed and braking pressure* – In: EuroBrake 2012 Proceedings, EB2012-FM-06, Dresden, 2012
- [52] Ozeki, Shinichi: *Investigation for Observing Presence and Distribution of Phenolic Resin in Friction Materials* – In: 22nd SAE Brake Colloquium, SAE 2004-01-2781, Anaheim (CA), 2004
- [53] Santamaria Razo, Diego A.; Merlo, Fabrizio; Borello, Gaia; Oliva, Cristiana; Buonficio, Pietro: *On the characterization of potassium titanates and the influence of their properties on efficiency and wear of brake linings* – In: EuroBrake 2012 Proceedings, EB2012-FM-16, Dresden, 2012
- [54] Cocina, Donato; Durando, Pietro; Spina, Giulia; Buonficio, Pietro: *A critical review of mercury porosimetry for brake pads characterization* – In: EuroBrake 2012 Proceedings, EB2012-TM-20, Dresden, 2012
- [55] Föll, Gregory: *Tracking bewegter Objekte in Videosequenzen*, Ausarbeitung, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Technik und Informatik, Department Informatik, 2010, <http://users.informatik.haw-hamburg.de/~ubicomp/projekte/master09-10-aw1/foell/bericht.pdf>, Aufruf vom 22.11.2012

- [56] Schwarzenberg, Gregor: *Objektverfolgung mit Partikel-Filtern*, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Informatik, Institut für interaktive Echtzeitsysteme, 2005, <http://home.arcor.de/karlremi.schuster/files/Diplomarbeit.pdf>, Aufruf vom 22.11.2012
- [57] Meier, Manuel; Rüegg, Christian: *Digitale Ecken- und Objekterkennung*, Studienarbeit, Hochschule Rapperswil, 2002
- [58] Benz, Michael: *Digitale Videoanalyse von Bewegungen – Neue Möglichkeiten mit der Software „measure Dynamics“*, Ausarbeitung, erste Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien, Bayerische Julius-Maximilians-Universität, Würzburg, 2008, http://www.thomas-wilhelm.net/veroeffentlichung/Arbeit_Benz.pdf, Aufruf vom 22.11.2012
- [59] Einer, Stefan: *Videoanalyse*, Seminararbeit, FernUniversität Hagen, Fachbereich Informatik, 2007, http://vu.fernuni-hagen.de/lvuweb/lvu/file/FeU/Informatik/2007SS/01909/ausarbeitungen/einer_videoanalyse_ausarbeitung.pdf, Aufruf vom 22.11.2012
- [60] N.N.: *Videoanalyse mit VIANA und CMA COACH 6 STUDIO MV VIDEOANALYSE*, Fakultät für Physik, Universität Regensburg, http://www.uni-regensburg.de/physik/didaktikphysik/medien/VeranstMat/ESemII Gy/info_videoanalyse_viava-coach.pdf, Aufruf vom 22.11.2012

- [61] Mück, Thomas; Wilhelm, Thomas: *Neue Möglichkeiten bei der Videoanalyse am Beispiel von Sportbewegungen* - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 7, 2009, S. 19 - 27, <http://www.thomas-wilhelm.net/veroeffentlichung/Sportbewegungen.pdf>, Aufruf vom 22.11.2012
- [62] Völpel, Martin; Pekrul, Sören; Weber, Thomas: *Image Processing: Objekterkennung*, 2006
- [63] Yilmaz, Alper; Javed, Omar; Shah, Mubarak: *Object Tracking: A Survey*, <http://vision.eecs.ucf.edu/papers/Object%20Tracking.pdf>, Aufruf vom 22.11.2012
- [64] Miene, Andrea: *Räumlich-zeitliche Analyse von dynamischen Szenen*, Dissertationsschrift, Fachbereich 3 (Mathematik und Informatik), Universität Bremen, 2003
- [65] Jakob, Thomas: *Robuste 2D-Objektverfolgung in Verkehrsszenen zur effizienten Gewinnung von Ground-Truth-Daten für die Bewertung von Fahrerassistenzsystemen*, Diplomarbeit, Fakultät für Informatik, Georg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg, 2008
- [66] Carter, Brian C.; Shubeita, George T.; Gross, Steven P.: *Tracking single particles: a user-friendly quantitative evaluation* – In: Physical Biology 2 (2005) 60-72, DOI: 10.1088/1478-3967/2/1/008, IOP Publishing Ltd., 2005

- [67] Back, Kristine; Puente León, Fernando: *Erfassung und Erkennung menschlicher Aktionen durch Tracking von Bewegungsmerkmalen* – In: *Technisches Messen* 79 (2012) 4, DOI: 10.1524/teme.2012.0221, Oldenbour Wissenschaftsverlag, 2012
- [68] Emde, Conrad: *Alternative Visualisierungsformen zeitvarianter Daten in der Medizin*, Studienarbeit, Fachbereich 4: Informatik, Universität Koblenz-Lindau, http://www.uni-koblenz.de/~cg/Studienarbeiten/SA_ConradEmde.pdf, Aufruf vom 22.11.2012
- [69] Demant, Christian; Streicher-Abel, Bernd; Springhoff, Axel: *Industrielle Bildverarbeitung*, DOI: 10.1007/978-3-642-13097-7, Springer-Verlag, Berlin, 2011
- [70] DIN 53804-1:2002-04: *Statistische Auswertungen, Teil 1: Kontinuierliche Merkmale*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2002
- [71] DIN 1319-3: *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 1996
- [72] DIN 1319-1: *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 1: Grundbegriffe*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 1995
- [73] DIN 13303: *Teil 1: Stochastik, Wahrscheinlichkeitstheorie, Gemeinsame Grundbegriffe der mathematischen und der beschreibenden Statistik, Begriffe und Zeichen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 1982

- [74] Klein, Ulrich: *Schwingungsdiagnostische Beurteilung von Maschinen und Anlagen*, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2003
- [75] Bader, Daniel: *Entwicklung einer flexiblen akustischen Meßmethode zur Detektierung von verzahnungstechnischen Qualitätsproblemen*, Dissertationsschrift, Technische Universität Ilmenau, 2006
- [76] Fahrmeier, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: *Statistik – Der Weg zur Datenanalyse*, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2011
- [77] Gränicher, H.: *Messung beendet – was nun?: Einführung und Nachschlagewerk für die Planung und Auswertung von Messungen*, vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich, 1996
- [78] Fulle, A.: *Bewertung der Partikelemissionen der Bremse hinsichtlich Größe und Material*, Masterarbeit, TU Ilmenau, 2011
- [79] Augsburg, K.; Sachse, H.; Krischok, S.; Horn, R.; Rieker, M.; Scheder, D.: *Brake dust measurement* – In: Eurobrake 2012 Proceedings, EB2012-TM-13, Dresden, 2012
- [80] Sanders et.al.: *Airborne Brake Wear Debris: Size Distributions, Composition and a Comparison of Dynamometer and Vehicle Tests* – In: Environ. Sci. Technol. 37, 2003
- [81] Augsburg, K.; Sachse, H.; Horn, R.; Gramstat, S.: *Brake Dust Emission* – In: Combustion generated nanoparticles, International ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zürich, 2011

- [82] Augsburg, K.; Horn, R.; Sachse, H.: *Characterization of particulate emissions of vehicle wheel brakes* – In: Innovation in Mechanical Engineering – Shaping the Future, Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 2011
- [83] Wegmann, E.; Stenkamp, A.; Ostermeyer, G.-P.: *Mesosopic Particel System for Modeling Anisotropic Effects of Friction Materials* – In: EuroBrake 2012 Proceedings, EB2012-FM-17, Dresden, 2012
- [84] Bruns, R.; Steffen, T.: *Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben* – In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1998) 6, S. 408-413
- [85] Zellbeck, H.; Augsburg, K.; Horn, R.; Brück, R.; Kröger, S.; Zaldua, N.: *Ein Vollkatalysatorsystem vor Abgasturbolader: Auslegung, Berechnung und Untersuchung am Motorprüfstand* – In: 14. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2009
- [86] Hülsenberg, D.: *Grundlagen der Glas- und Keramikwerkstoffe*, Vorlesungsskript der Vorlesungsreihe „Werkstoffe II“, TU Ilmenau, Ilmenau, 2001
- [87] Datenblatt zu industriellem Saphirglas der Firma Grazyna Walawski Industriesaphire,:
http://www.sappro.de/contentDEU/GWI_Saphir_Eigenschaften.pdf
, Aufruf vom 03.09.2013
- [88] Datenblatt Borosilikatglas der Firma Edmund Optics Inc.:
<http://www.edmundoptics.com/optics/windows-diffusers/ultraviolet-uv-infrared-ir-windows/borofloat-borosilicate-windows/1913>, Aufruf vom 04.09. 2013

- [89] Vogel, Werner: *Glaschemie*, Springer Verlag, Berlin, 1992, ISBN 978-3-540-55171-3
- [90] Bargel, Hans Jürgen; Schulze, Günter: *Werkstoffkunde*, Springer Verlag, Berlin, 2008, ISBN 978-3-540-79296-3
- [91] Materialspezifikationen der Firma Giesserei Chru AG:
<http://www.giesserei-chur.ch/sites/pdf/schmelzbetrieb.pdf>, Aufruf vom 04.09. 2013
- [92] SAE J2522-2003: *Dynamometer Global Brake Effectiveness*, SAE International, Warrendale, USA, 2003
- [93] Krause, Werner: *Gerätekonstruktion in der Feinwerktechnik und Elektronik*, Carl Hanser Verlag, München, 2000, ISBN 3-446-19608-0
- [94] N.N.: *Einführung in Rauheits- und Profilmessungen*, Informationsbroschüre, Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, 2009
- [95] N.N.: *Umfassender Vergleich – Optisches Mikroskop im Vergleich zu Digitales Mikroskop*, Informationsbroschüre, Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, 2010
- [96] N.N.: *Vorstellung des VW-9000 Digitalmikroskops mit High-Speed-Kamera*, Informationsbroschüre, Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, 2011
- [97] DIN 4760: *Gestaltabweichungen*, Normschrift, Beuth Verlag, Berlin, Juni 1982

- [98] VDI / VDE 2602: *Rauheitsmessung mit elektrischen Tastschnittgeräten*, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1983
- [99] Wiehr, Christian, Seewig, Jörg: *3D-Kenngrößen nach ISO 25178*, Technische Universität Kaiserslautern, <http://ak-rauheit.de/files/3D%20Kenng%F6%DFen.pdf>, Aufruf vom 26.02.2013
- [100] DIN EN ISO 25178: *Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft*, Beuth Verlag, Berlin, 2009

12 Eigene Veröffentlichungen und Vorträge

- [1] Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian:
Entwicklung eines hochdynamischen, ortsauflösenden Sensors zur Analyse des Kontakts zwischen Bediener und Bedienelement, 53rd IWK / Workshop „Komfort-Optimierung und Mensch-Maschine-Schnittstellen in mobilen Systemen“, Ilmenau, 12.09. 2008
- [2] Husung, Stephan; Neher, Jochen; Gramstat, Sebastian; Weber, Christian; Wender, Bernd; Augsburg, Klaus:
Auralisierung simulierter akustischer Eigenschaften eines Hinterachsgetriebes unter Nutzung von Virtual Reality – In: *Augmented & virtual reality in der Produktentstehung / Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung ; 8 (Paderborn) : 2009.05.28-29. - Paderborn : Heinz-Nixdorf-Inst., Univ. Paderborn (2009), S. 257-271*
- [3] Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian:
Experimentelle Ansätze zu Schwingungsanalysen an elektrischen Kleinmaschinen, Kolloquium Kleinmaschinen, Ilmenau, 20.03.2009
- [4] Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian:
Flexibles Druckverteilungsmeßsystem „PiCo Cube“ zur Optimierung von Bremssystemen, Workshop Mikrosystemtechnik und Mikroelektronik in Sachsen und Thüringen, Zwickau, 14.05. 2009

- [5] Husung, Stephan; Weber, Christian; Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian:
Simulation Of Acoustical Product Properties For Technical Systems In Virtual Environments – In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED'09, Stanford University, Stanford, CA (USA), 24.-27.08.2009
- [6] Augsburg, Klaus; Augustin, Jörg; Gramstat, Sebastian; Schmidt, Karl-Heinz; Stahl, Joachim; Schlegel, Steffen; Sünder, Robert:
Energiespeicher für mobile Anwendungen – AUTOMOTIVE, Studie im Auftrag der LEG Thüringen mbH, Ilmenau, März 2009
- [7] Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian; Schache, Hannes; Rabich, Stefan:
Piezocomposite-Druckverteilungssensor PiCo Cube, Abschlußbericht, Thüringer Verbundprojekt (Projekt-Nr.: 2006 VF 0280), Ilmenau, 2008
- [8] Weber, Christian; Höhne, Günther; Augsburg, Klaus; Husung, Stephan; Gramstat, Sebastian:
Sound-Design und Maschinenakustik in der Virtuellen Realität – In: Industrie Management, Ausgabe 02/2010, Gito Verlag, Berlin, 2010
- [9] Ivanov, Valentin; Shyrokau, Barys; Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian:
Advancement of vehicle dynamics control with monitoring the tire rolling environment – In: Tire and wheel technology and vehicle dynamics and handling, SAE World Congress, Detroit / Michigan, 2010 (2010.04.13-15 – Warrendale, Pa. : SAE International, 2010)

- [10] Ivanov, Valentin; Shyrokau, Barys; Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian:
Advancement of Vehicle Dynamics Control with Monitoring the Tire Rolling Environment – In: SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems, August 2010, vol. 3, no. 1, p. 199-216, ISSN: 1946-3995 (print)
- [11] Augsburg, Klaus; Sachse, Hannes; Horn, Rüdiger; Gramstat, Sebastian:
Measures development for brake dust emissions with Computational Fluid Dynamics and Particle Image Velocimetry – In: SAE Brake Colloquium Proceedings, New Orleans, SAE 11BC-0059, 2011
- [12] Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian; Horn, Rüdiger; Ivanov, Valentin; Sachse, Hannes: *Investigation of brake control using Test-Rig-In-The-Loop technique* – In: SAE Brake Colloquium Proceedings, New Orleans, SAE 11BC-0058, 2011
- [13] Holstein, Peter; Surek, Dominik; Tharandt, Andreas; Münch, Hans-Joachim; Gramstat, Sebastian:
Möglichkeiten der Maschinen-diagnose mit Ultraschall, 37. Jahrestagung für Akustik (DAGA), Düsseldorf, 21.-24.03.2011
- [14] Holstein, Peter; Bader, Nicki; Gramstat, Sebastian:
Die Physik des Blindenstocks... – Orientierungshilfe – In: Fachzeitschrift des Bundesverbandes der Rehabilitationslehrerinnen und -lehrer für Blinde und Sehbehinderte, Ausgabe 34, Erfurt, Januar 2011

Eigene Veröffentlichungen und Vorträge

- [15] Holstein, Peter; Surek, Dominik; Tharandt, Andreas; Gramstat, Sebastian; Münch, Hans-Joachim:
Maschinendiagnose mit erweitertem Frequenzbereich, 18. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, Wetzlar, 27.-28.10.2011
- [16] Augsburg, Klaus; Sachse, Hannes; Horn, Rüdiger; Gramstat, Sebastian:
Brake Dust Emission, 15th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zürich, 26.-29.06.2011
- [17] Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian; Stengl, Benjamin:
Visualisation Possibilities of the Friction Zone of Dry-Running Friction Couples – In: EuroBrake 2012 Proceedings, EB2012-TM-02, Dresden, 16.-18.04.2012
- [18] Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian; Horn, Rüdiger; Ivanov, Valentin; Sachse, Hannes; Shyrokau, Barys:
Test-Rig-in-the-Loop (TRIL) Application to Controllable Brake Processes – In: EuroBrake 2012 Proceedings, EB2012-TM-16, Dresden, 16.-18.04.2012
- [19] Augsburg, Klaus; Ivanov, Valentin; Kruchkova, Katja; Höpping, Kristian; Gramstat, Sebastian; Bogdevicius, Marijonas; Kiss, Peter:
Project ADYTRE: Towards dynamic tyre inflation control, FISITA Weltkongress, F2012-G03-002, Peking, 27.-30.11.2012
- [20] Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian; Stengl, Benjamin; Benjamin Schellakowsky: *Analysis of processes inside the friction zone of passenger car brake systems* – In: EuroBrake 2013 Proceedings, EB2013-FID-005, Dresden, 17.-19.06.2013

- [21] Augsburg, Klaus; Gramstat, Sebastian; Thomas, Bernard; Benjamin Schellakowsky: *New characterization methods of spatial porosity distributions of friction linings* – In: EuroBrake 2013 Proceedings, EB2013-FMC-022, Dresden, 17.-19.06.2013

13 Anhang

13.1 Stand der Technik

13.1.1 Reibmechanismen – Modelle und Charakterisierungen

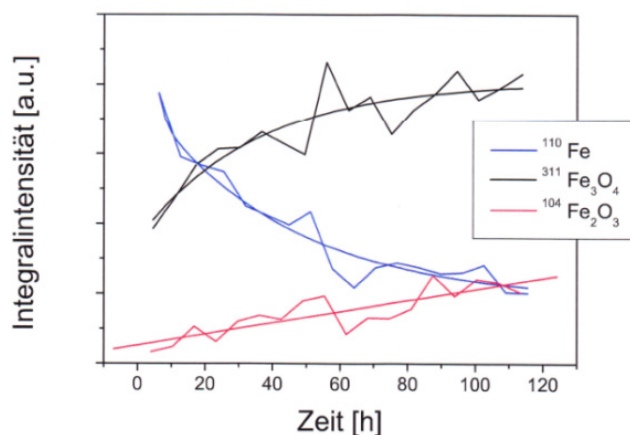


Abb. 13.1: Betrachtungen zur Eisenkonzentration des Reibfilms für oberflächennahe Bereiche der Bremsscheibe, [6]

13.1.2 Analysen der Reibelagporosität

Brake Pads	Dimensions in mm (length/width/ thickness)	Density in g/cm ³	Open Porosity in %
C/SiC	20/20/10	1.95	1.3
C/SiC Si-free	20/20/10	1.62	15.3

Abb. 13.2: Darstellung der Ergebnisse, nach [51]

Material	Bulk density [cc/g]	Porosity (He pycnometer) [%]	Porosity (Hg porosimetry) [%]
NAO-1	2.57	26.0	17.3
NAO-2	2.14	24.8	14.8
NAO-3	2.51	26.0	19.7

Abb. 13.3: Ergebnisse der Untersuchungen, [54]

13.1.3 Charakterisierungs- und Klassifizierungsmethoden

Arithmetischer Mittelwert

$$\bar{f}(t) = \frac{1}{T_P} \int_{-\frac{T_P}{2}}^{+\frac{T_P}{2}} f(t) dt \quad (13.1)$$

Effektiver Mittelwert

$$a_{eff} = \frac{\hat{a}}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{T_P} \int_{-\frac{T_P}{2}}^{+\frac{T_P}{2}} f(t)^2 dt} \quad (13.2)$$

Varianz / Streuung

$$var = \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \bar{x})^2 \quad (13.3)$$

Standardabweichung

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13.4)$$

Crest-Faktor

$$C_F = \frac{x_{ss}}{2 * x_{eff}} = \frac{\max(|s(t_n)|)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s(t_n)^2}} \quad (13.5)$$

Mittlere spektrale Energie

$$W = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)^2 dt \quad (13.6)$$

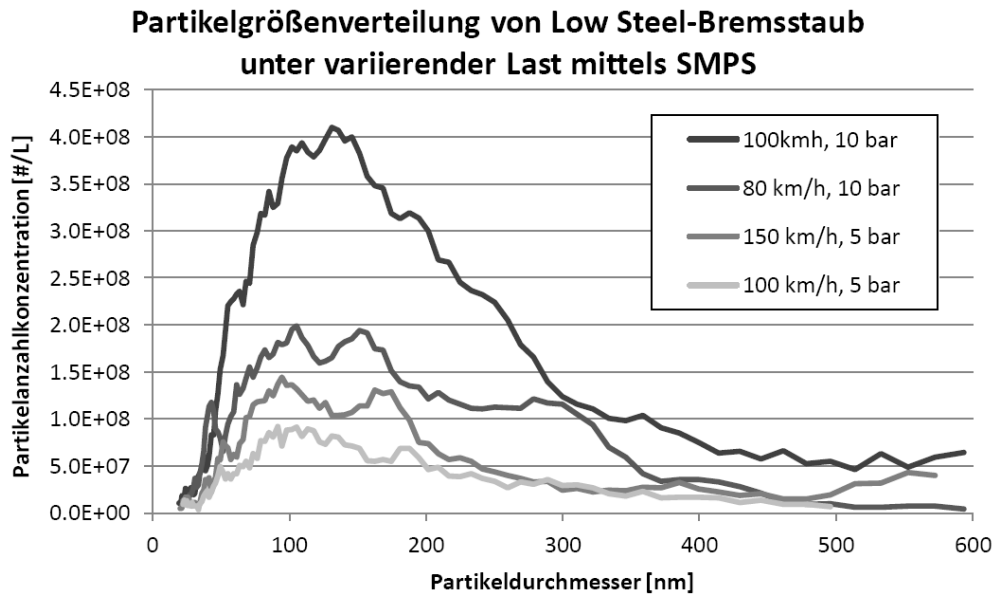


Abb. 13.4: Partikelgrößenverteilungen für verschiedene Lastzustände, ECE-Belag, aus [78]

13.2 Experimentelle Prüfumgebung

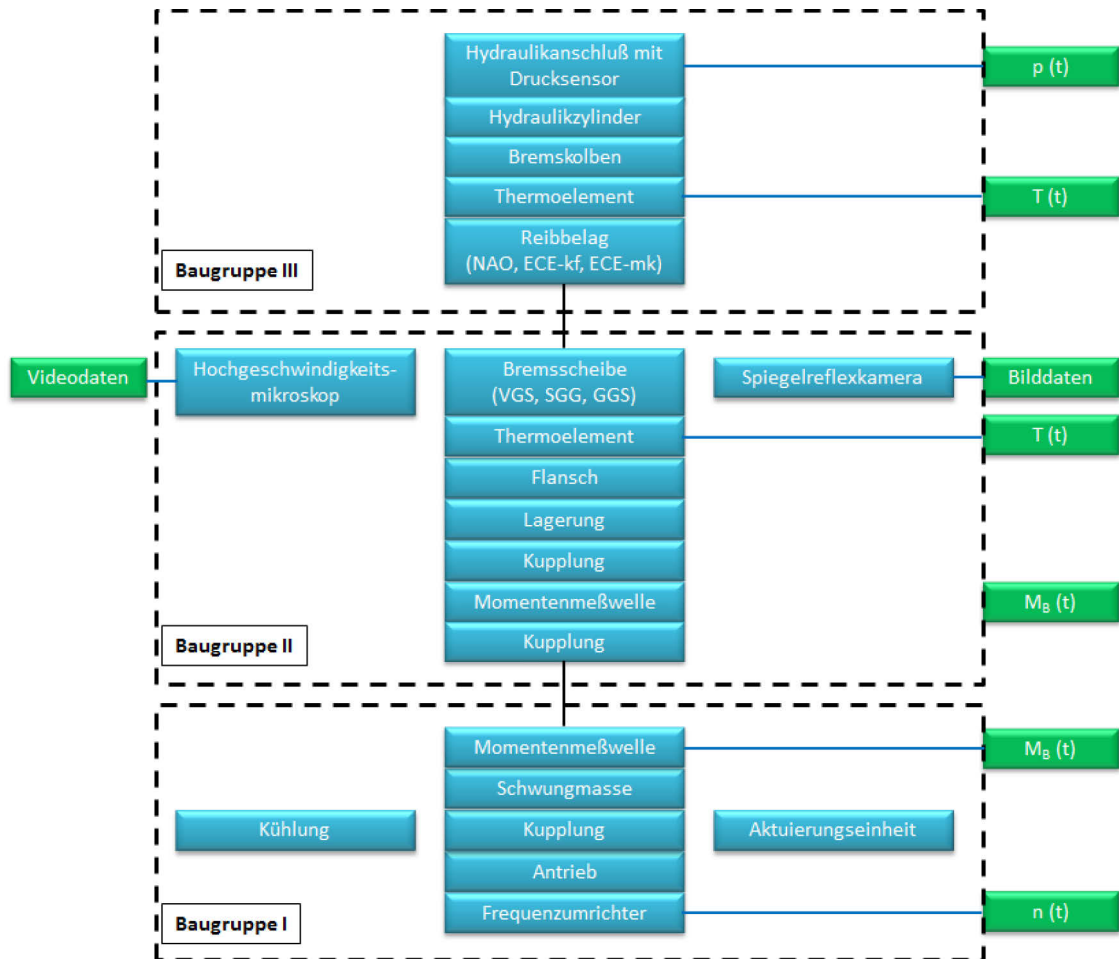


Abb. 13.5: Struktur des FTM

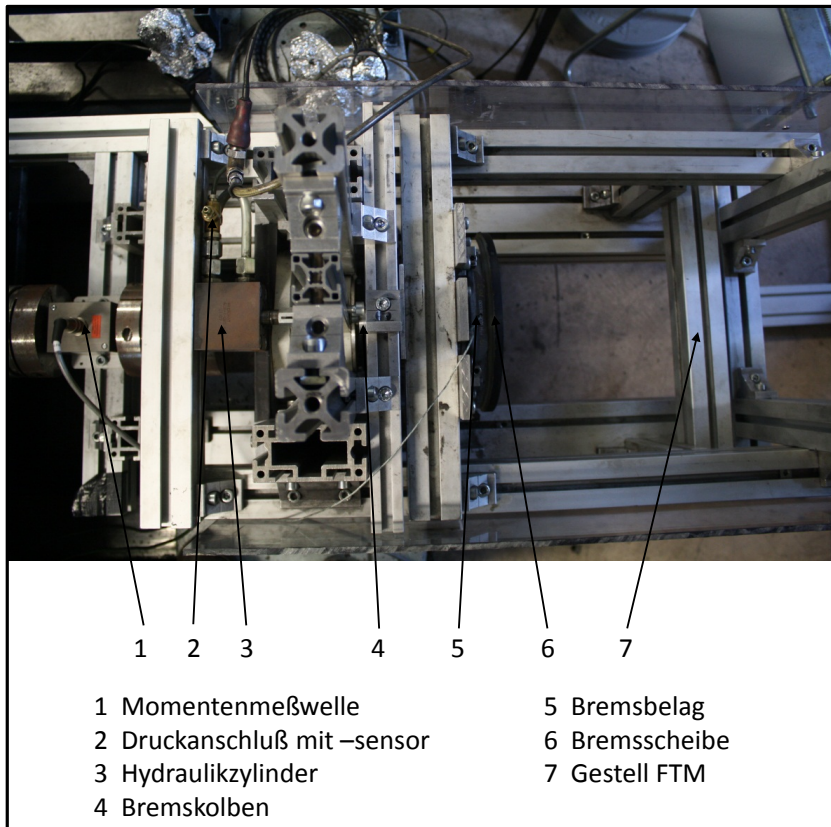


Abb. 13.6: Draufsicht auf das aufgebaute FTM

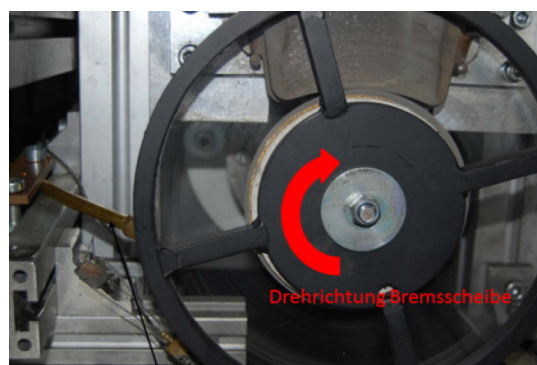


Abb. 13.7: Benetzungseinrichtung für Naßreibversuche am FTM

Tab. 13.1: Vergleich ausgewählter Eigenschaften von Gläsern und Grauguß

	Saphirglas	Quarzglas	Borosilikatglas	GG 15 HC	GG 25
Dichte ρ [kg/m ³]	≈ 4000	≈ 2200	≈ 2250 - 2500	7000	7300
Zugfestigkeit [MPa]	400	50	35 - 100	150	300
Relative Härte [HB/100+0,44·R _m]	7,23	5,3 - 6,5	1,52	0,96	0,86
Elastizitätsmodul [kN/mm ²]	400	70	63	70	135
thermischer Ausdehnungskoeffizient α [K ⁻¹]	≈ 8·10 ⁻⁶	≈ 5·10 ⁻⁷	≈ 3,3·10 ⁻⁶	≈ 9·10 ⁻⁶	≈ 13·10 ⁻⁶

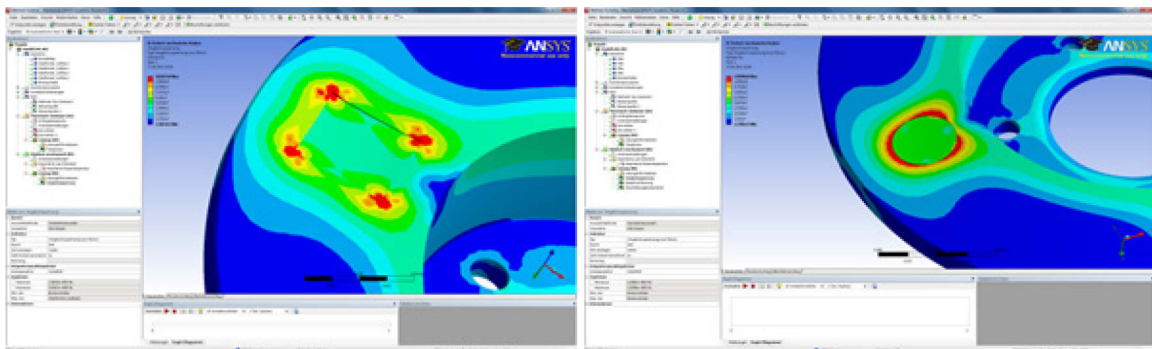


Abb. 13.8: Darstellung der mechanischen Spannungen im Bauteilverbund

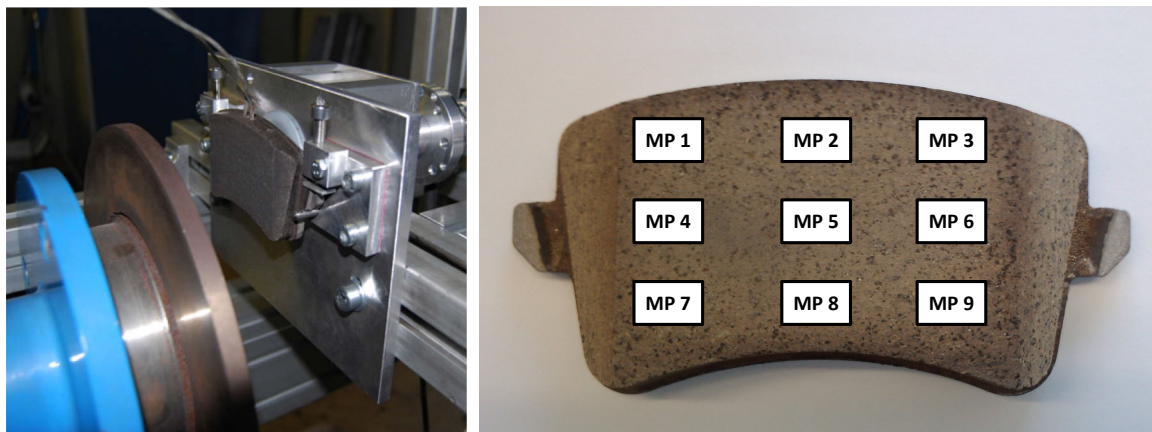


Abb. 13.9: Versuchsanordnung des Reibbelags mit einer Grauguß-Bremsscheibe (GGs, links), Meßschema der Belagoberfläche mit 9 Meßpunkten (rechts)

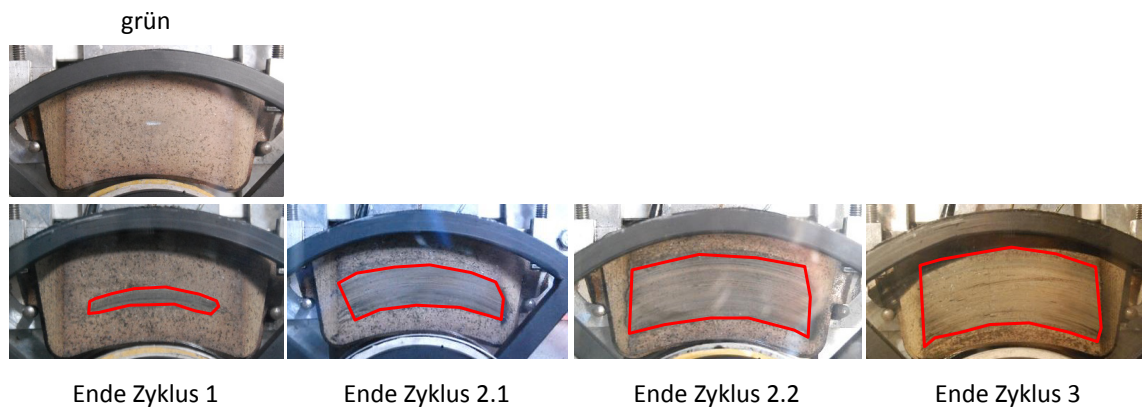


Abb. 13.10: Darstellung der Kontaktsituation Belag – Reibring für einen NAO-Belag (Bedding-Zyklus)

13.3 Visualisierungsuntersuchungen zum in-situ Reibverhalten

Tab. 13.2: Spezifikation des Objektivs VH-Z20 für die Hochgeschwindigkeitsmikroskopie

Objektiv VH-Z20 R / Z20 W							
Vergrößerung		20x	30x	50x	100x	150x	200x
Bildausschnitt [mm]	Horizontal	15,24	10,16	6,1	3,05	2,03	1,52
	Vertikal	11,4	7,6	4,56	2,28	1,52	1,14
	Diagonal	19,05	12,7	7,62	3,81	2,54	1,91
Betrachtungsabstand [mm]		25,5					

Tab. 13.3: Spezifikation des Objektivs VH-Z50 für die Hochgeschwindigkeitsmikroskopie

Objektiv VH-Z50 L / Z50 W							
Vergrößerung		50x	100x	200x	300x	400x	500x
Bildausschnitt [mm]	Horizontal	6,1	3,05	1,52	1,02	0,76	0,61
	Vertikal	4,56	2,28	1,14	0,76	0,57	0,46
	Diagonal	7,62	3,81	1,91	1,27	0,95	0,76
Betrachtungsabstand		85					

13.3.1 Lokales Patchverhalten

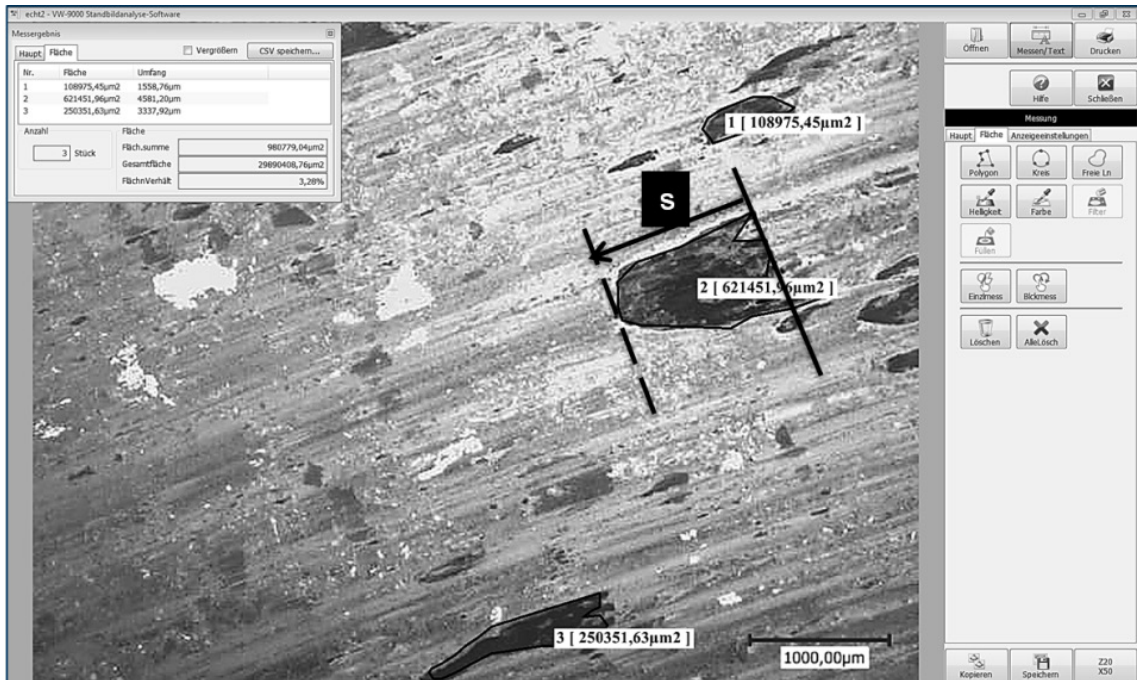


Abb. 13.11: Standbildvermessung (Flächenanalyse) „VW Motion Analyzer“

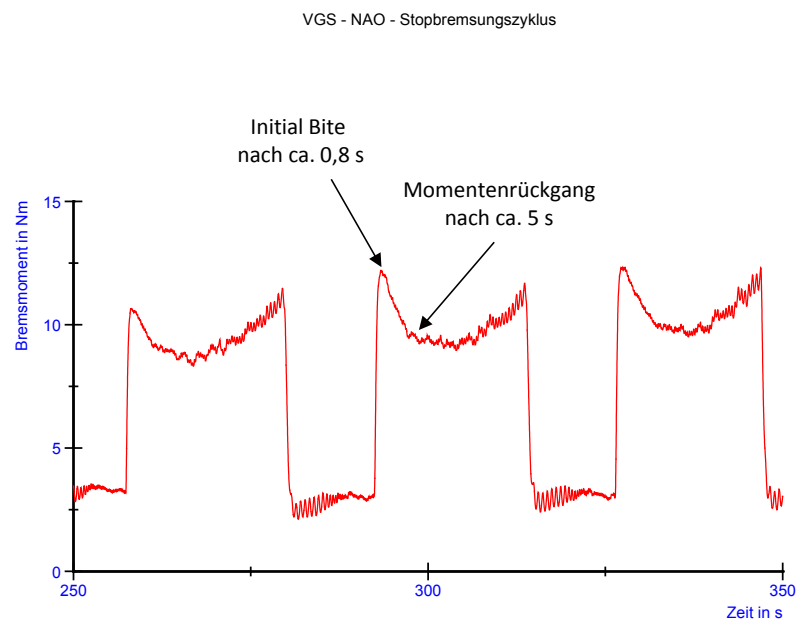


Abb. 13.12: Momentenverlauf einer Stopbremsungssequenz für VGS – NAO

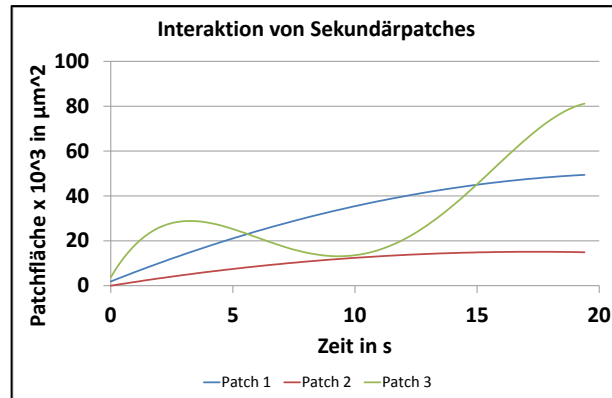


Abb. 13.13: approximierte Patchflächen während einer Stopbremsung, VGS – ECE-kf

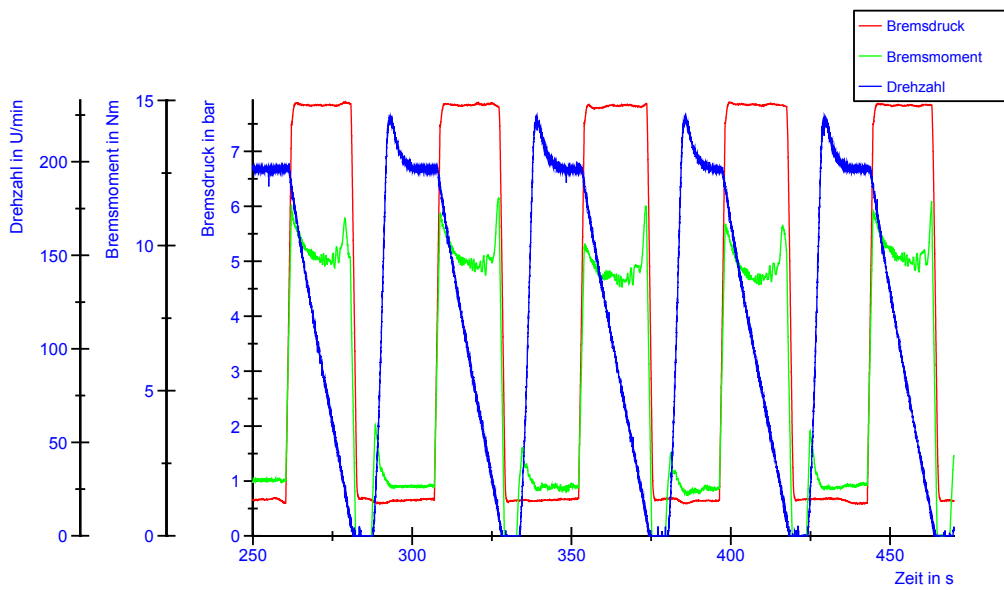


Abb. 13.14: Verlauf der Betriebsparameter für eine Sequenz von Stopbremsungen, VGS – NAO

13.3.2 Lokales Partikelverhalten

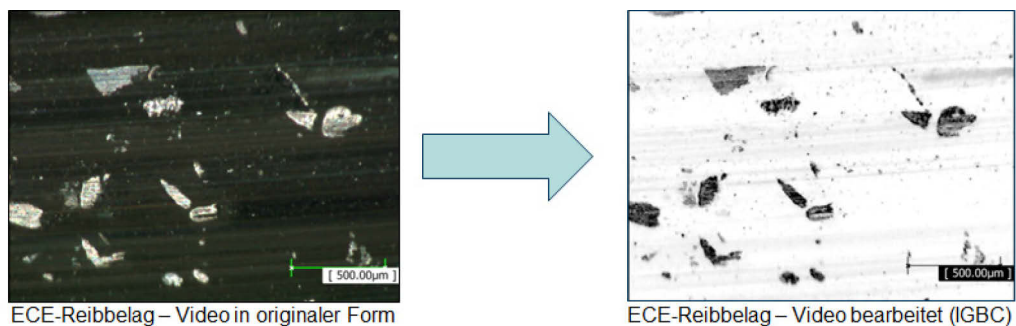


Abb. 13.15: Videobearbeitung zur Vorbereitung der Partikelanalysen

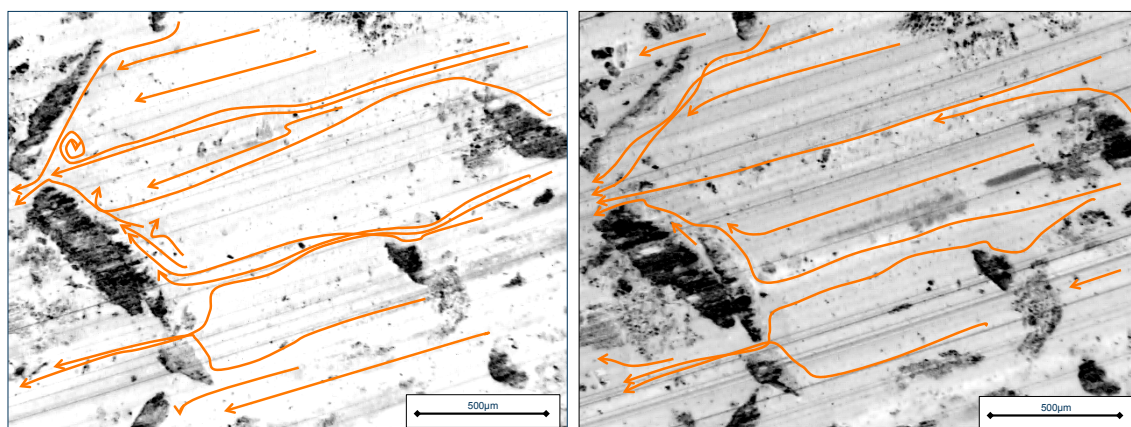


Abb. 13.16: Partikelbahnverengung ECE-kf (links), Öffnung der Verengung (rechts) – invertierte und gefilterte Aufnahmen

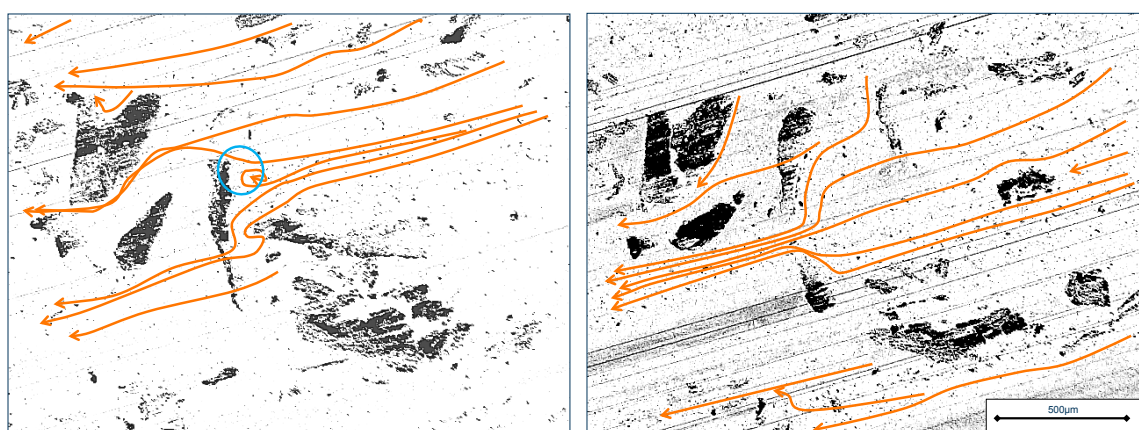


Abb. 13.17: Partikelflußstauung (links), Partikelflußbeschleunigung (rechts) – invertierte und gefilterte Aufnahmen

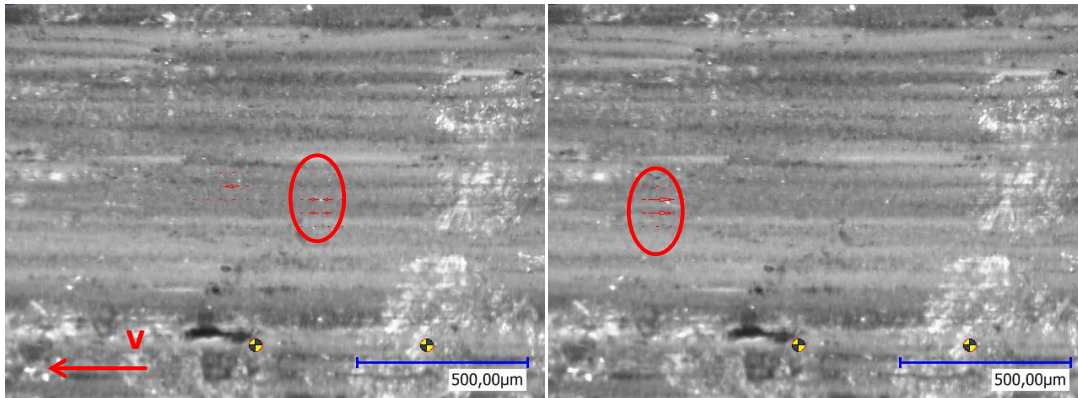


Abb. 13.18: Detektierte Geschwindigkeitsvektorfelder (Markierung) von Feinstpartikeln bei einem NAO, $n = 200 \text{ U/min}$ bzw. $v = 1,65 \text{ m/s}$

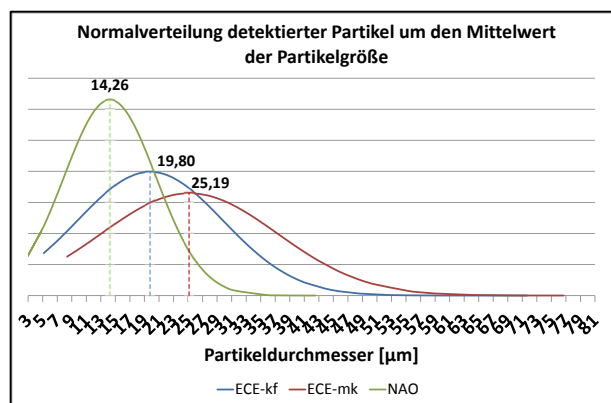


Abb. 13.19: Partikelgrößenverteilung (Dichtekurve) für NAO, ECE-kf sowie ECE-mk

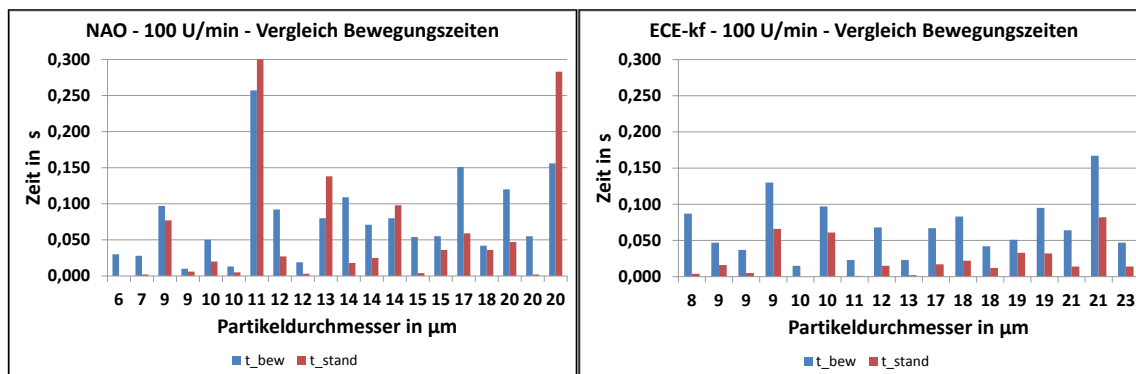


Abb. 13.20: Vergleich der Bewegungszeiten für NAO (links) und ECE-kf (rechts)

13.3.3 Möglichkeiten lokaler Patch- und Partikelanalysen unter Verwendung segmentierter Graugußscheiben (SGG)

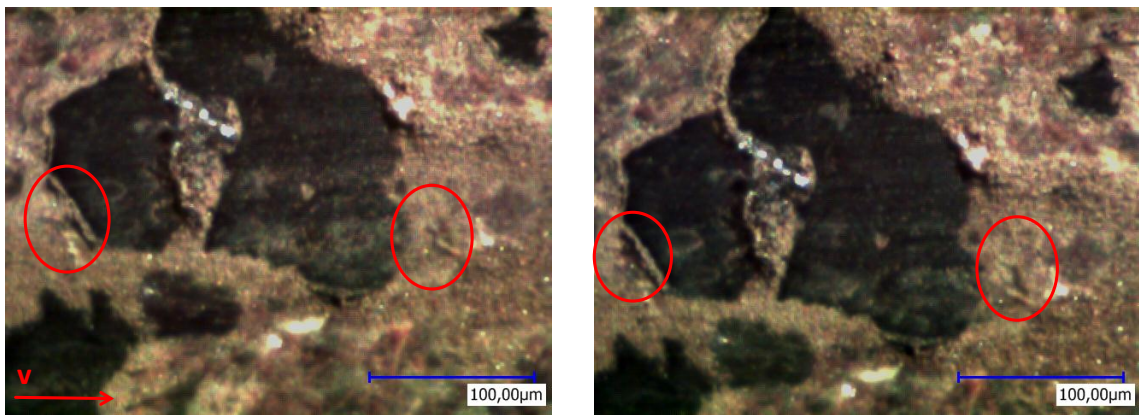


Abb. 13.21: lokale Patchdynamik während einer Stopbremsung, 300-fache Vergrößerung, bei 19,1 s (links) und 26,4 s (rechts), SGG_v

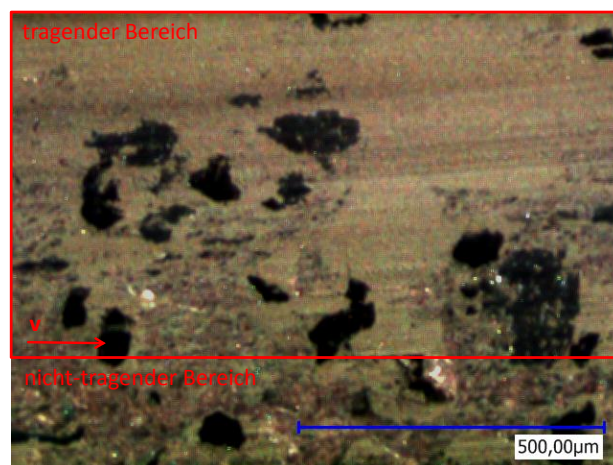


Abb. 13.22: Übergang zwischen tragendem und nicht-tragendem Bereich, Stopbremsung, 100-fache Vergrößerung, SGG_e



Abb. 13.23: lokale Patchdynamik während einer Stopbremsung, 100-fache Vergrößerung, bei 0,4 s (links), 4,7 s (Mitte) und 5,3 s (rechts) der Bremsung, SGG_e

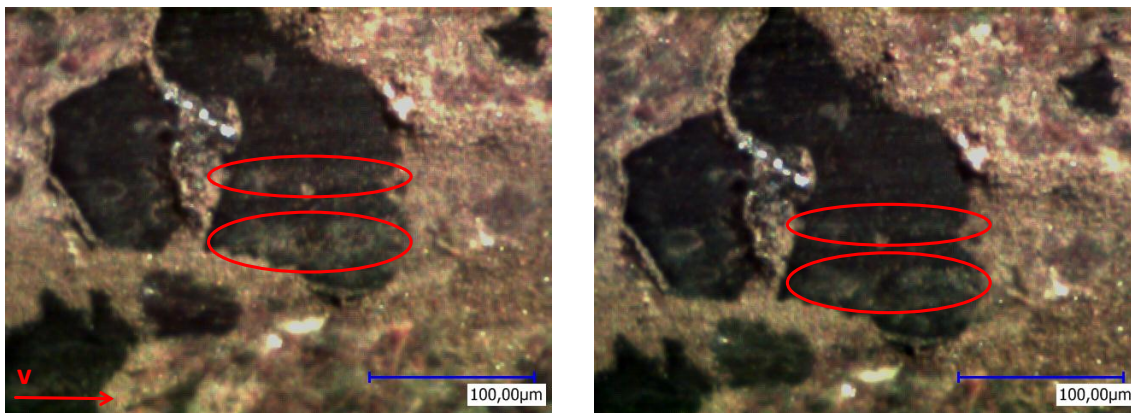


Abb. 13.24: lokale Partikeldynamik während einer Stopbremsung, 300-fache Vergrößerung, bei 19,1 s (links) und 26,4 s (rechts), SGG_v

13.3.4 Lokales Patch- und Partikelverhalten unter globalem Bezug

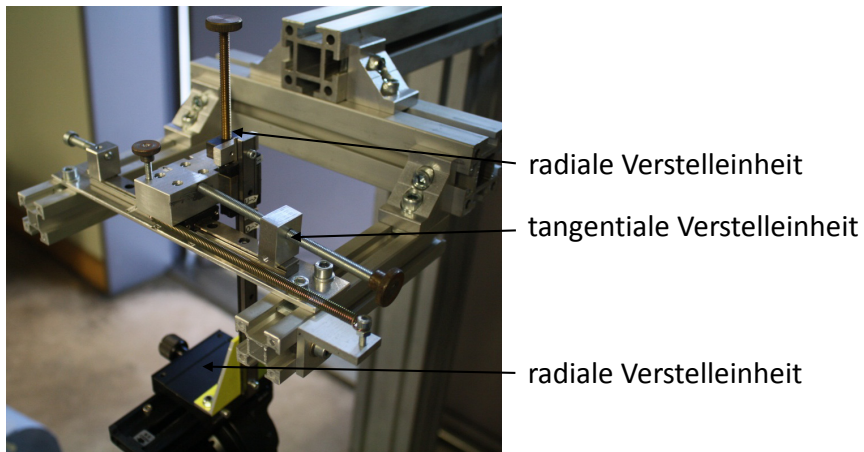


Abb. 13.25: Verstelleinheit für das Hochgeschwindigkeitsmikroskopsystem

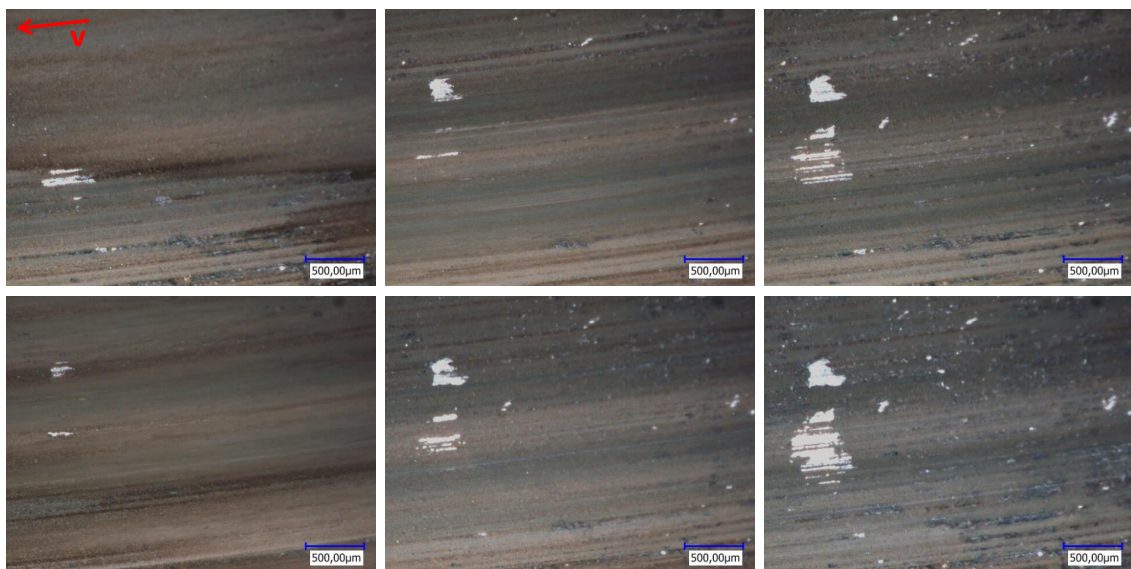


Abb. 13.26: Reibzonenanschnitte bei MP 5 zu Beginn, Mitte und Ende der Bremsung für SN 1 (obere Zeile) und SN 3 (untere Zeile)



Abb. 13.27: Reibzonenanschnitt bei MP 9 zu Beginn, Mitte und Ende der Bremsung für SN 2

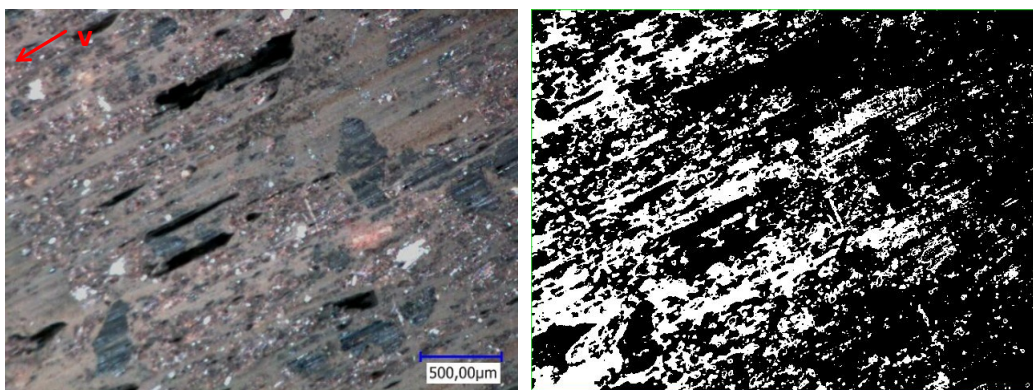


Abb. 13.28: Originalbild (links) und Binärbild zur Detektion der losen Abriebpartikel (rechts) bei MP 4 für SN 2 zur Mitte der Bremsung

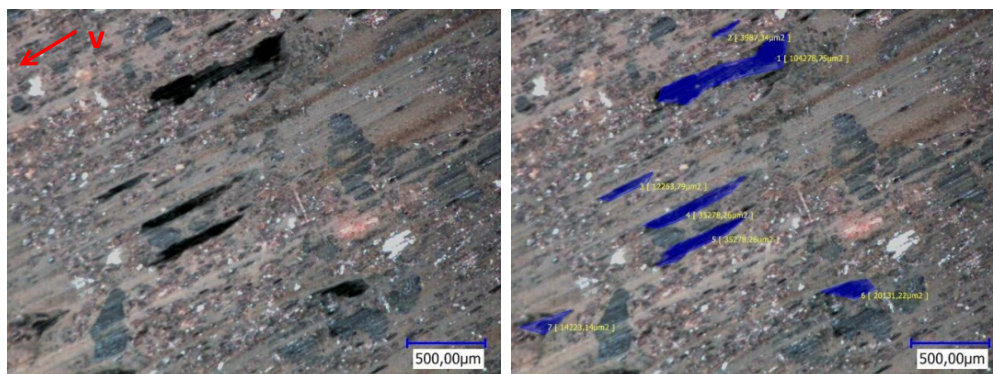


Abb. 13.29: Originalbild (links) und Markierung der Sekundärpatches (rechts) bei MP 4 für SN 2 zur Mitte der Bremsung

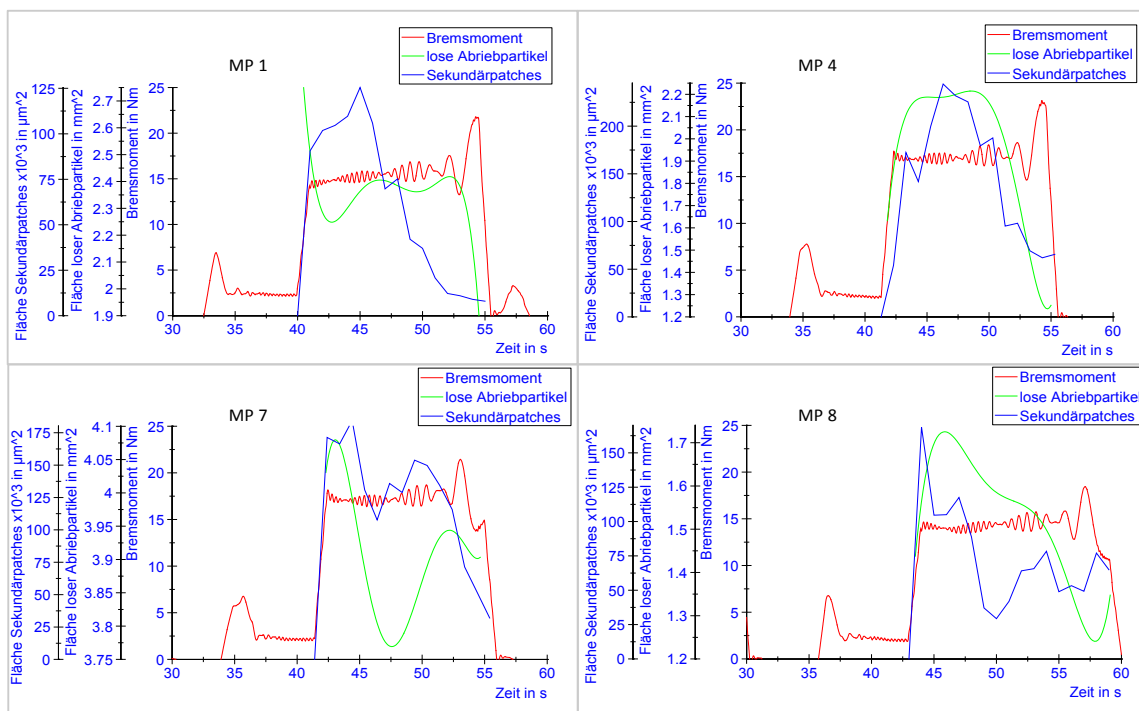


Abb. 13.30: Vergleich der Kontaktbereiche mit dem Bremsmoment für SN 2 (MP 1, 4, 7, 8)



Abb. 13.31: einsetzende Überspülung von Kleinstpartikelströmen bei MP 6, nach 15 s (links), 21 s (Mitte) sowie 30 s (rechts) der Bremsung 2

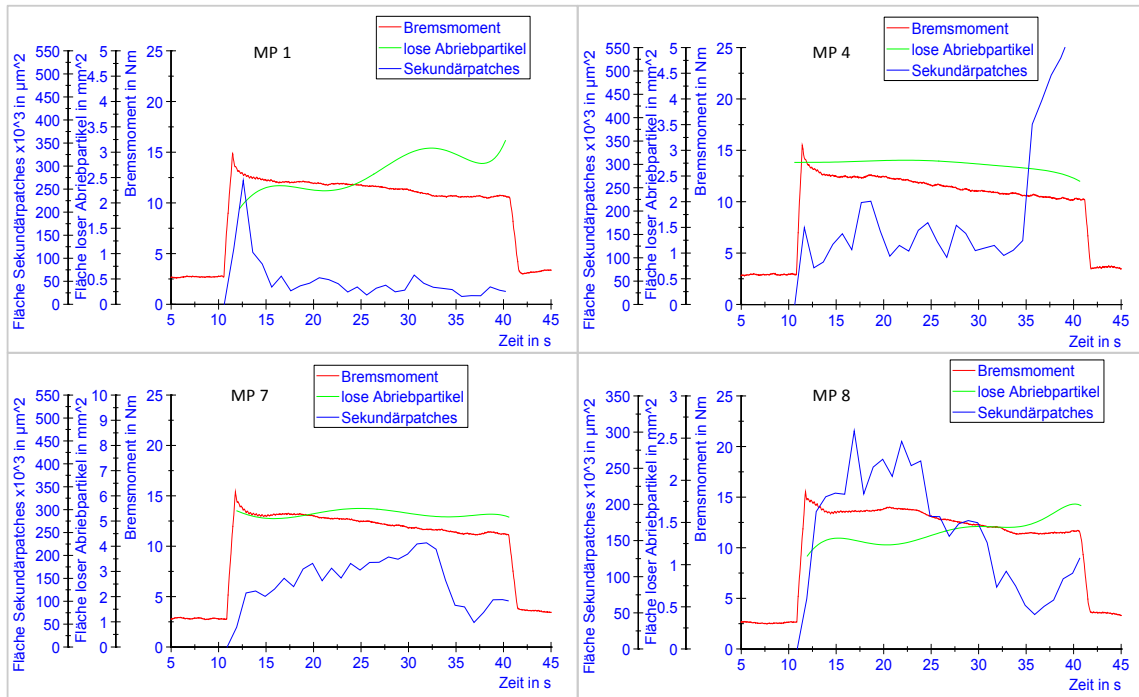


Abb. 13.32: Vergleich der Kontaktbereiche mit dem Bremsmoment für SN 1 (MP 1, 4, 7, 8)

13.3.5 Globales Patchverhalten

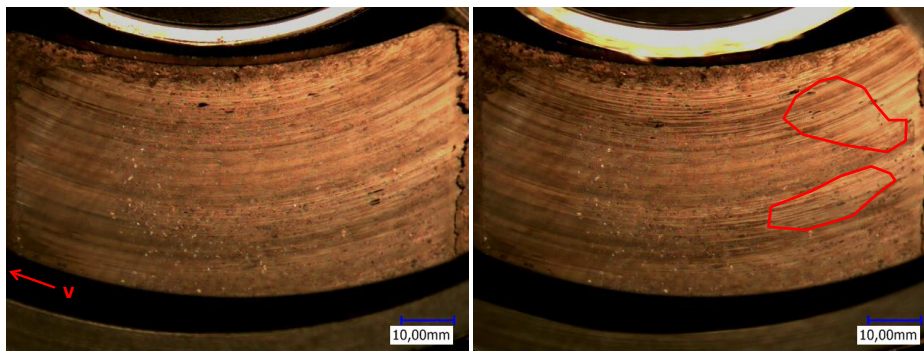


Abb. 13.33: Reibzone im Stillstand (links) sowie unmittelbar vor der Druckapplikation (rechts), Schleppbremsung

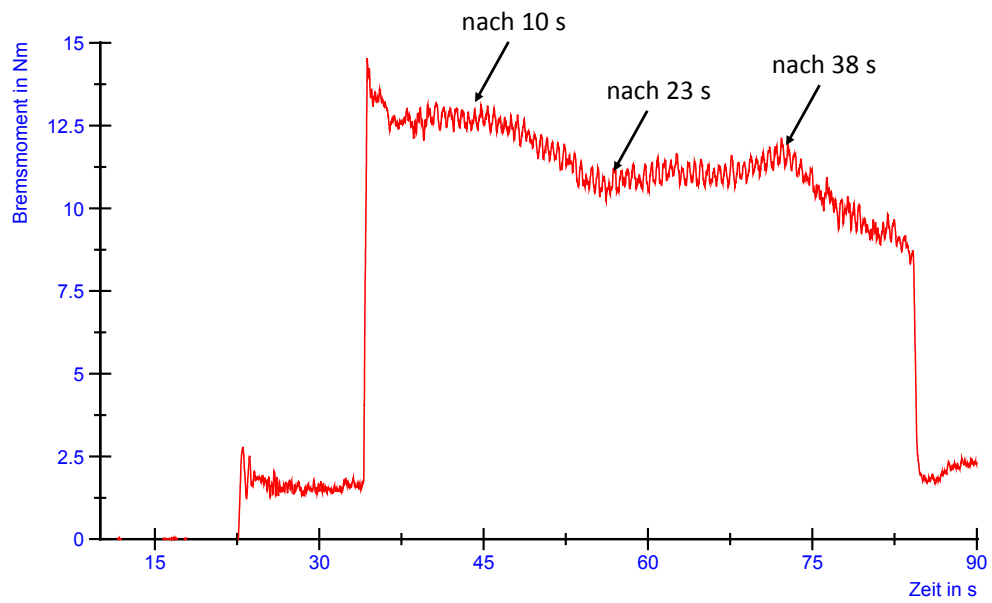


Abb. 13.34: markante Bereiche im Momentenverlauf der Schleppbremsung SN 1

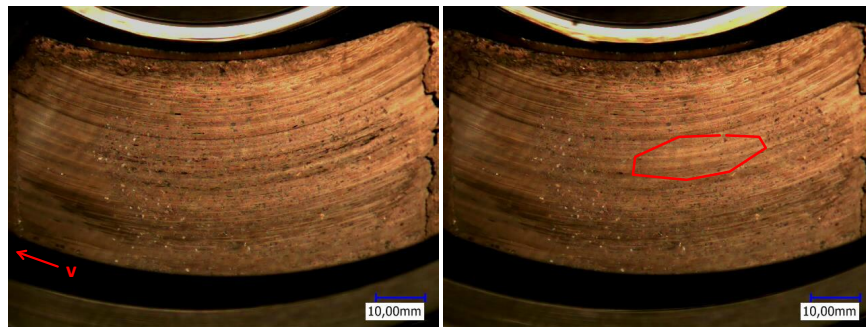


Abb. 13.35: Reibzone unmittelbar dem Ende der Druckapplikation von SN 1 (links) und unmittelbar vor der Druckapplikation von SN 2 (rechts)

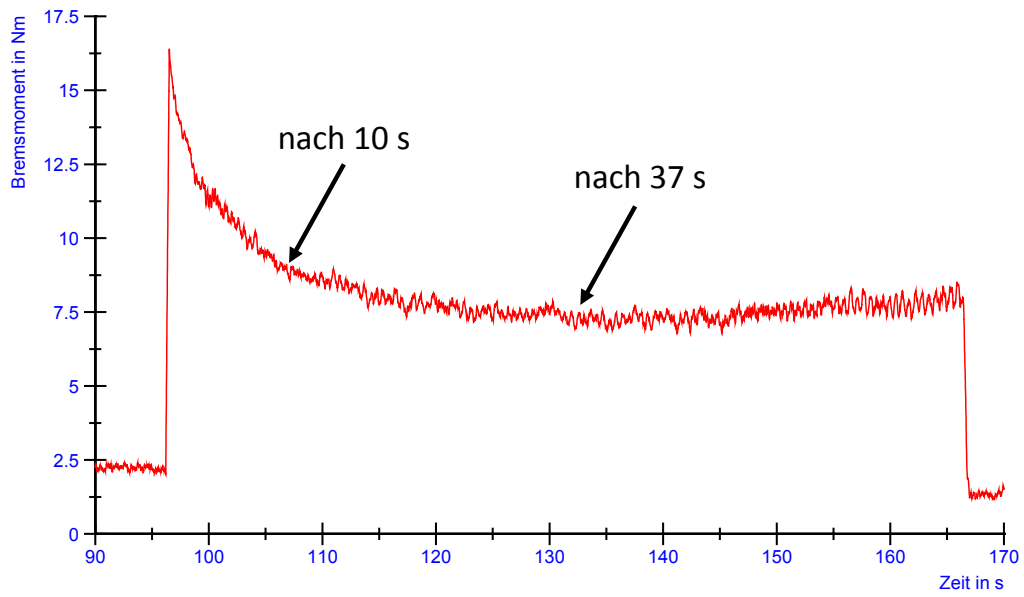


Abb. 13.36: markante Bereiche im Momentenverlauf der Schleppbremsung SN 2

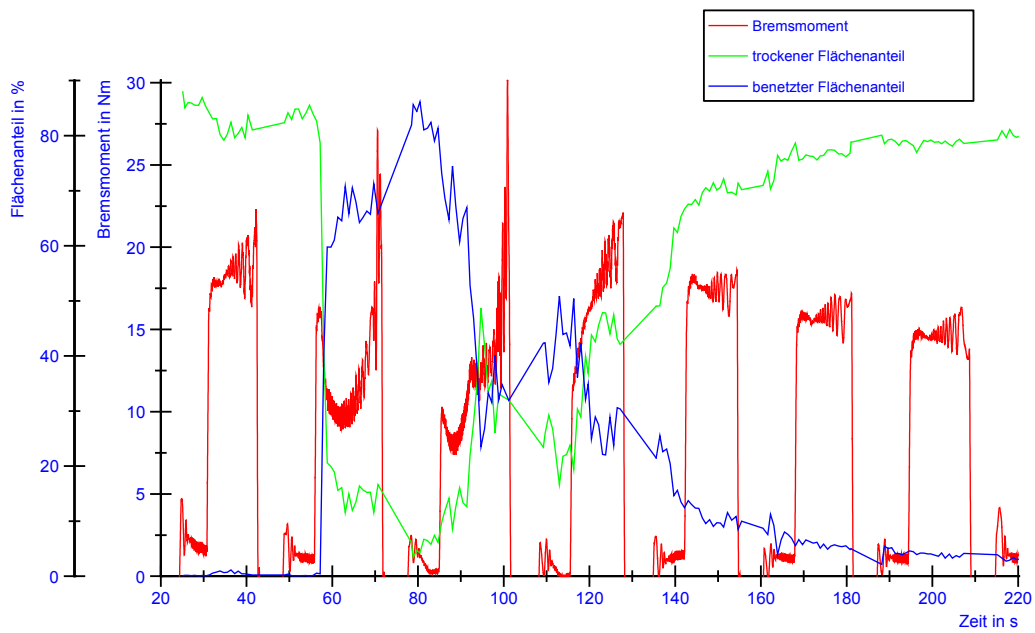


Abb. 13.37: Stopbremsungssequenz „Naßversuch“



Abb. 13.38: trockene Reibzone vor der Benetzung (links) – Wasserkeilprägung während einer Stoppbremung (Mitte) und deren Abnahme zum Ende der Bremsung (rechts)

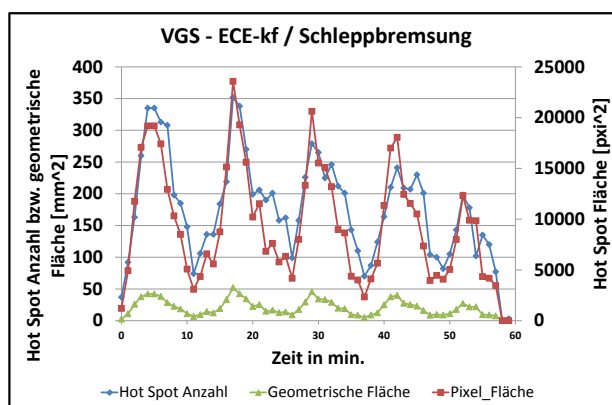


Abb. 13.39: Verhalten von Hot Spot Anzahl, -Fläche sowie geometrischer Fläche, Schleppbremsung, VGS – ECE-kf

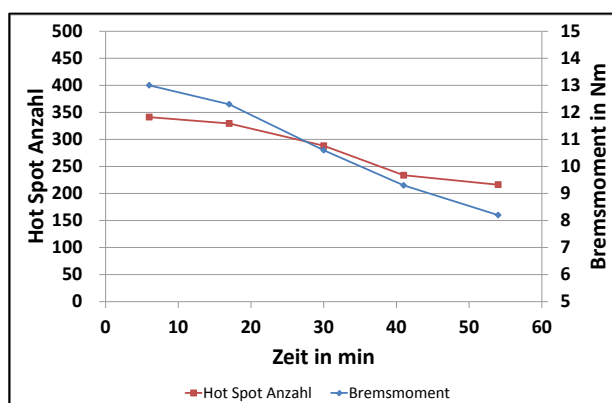


Abb. 13.40: globales Trendverhalten von Bremsmoment und Fleckenanzahl

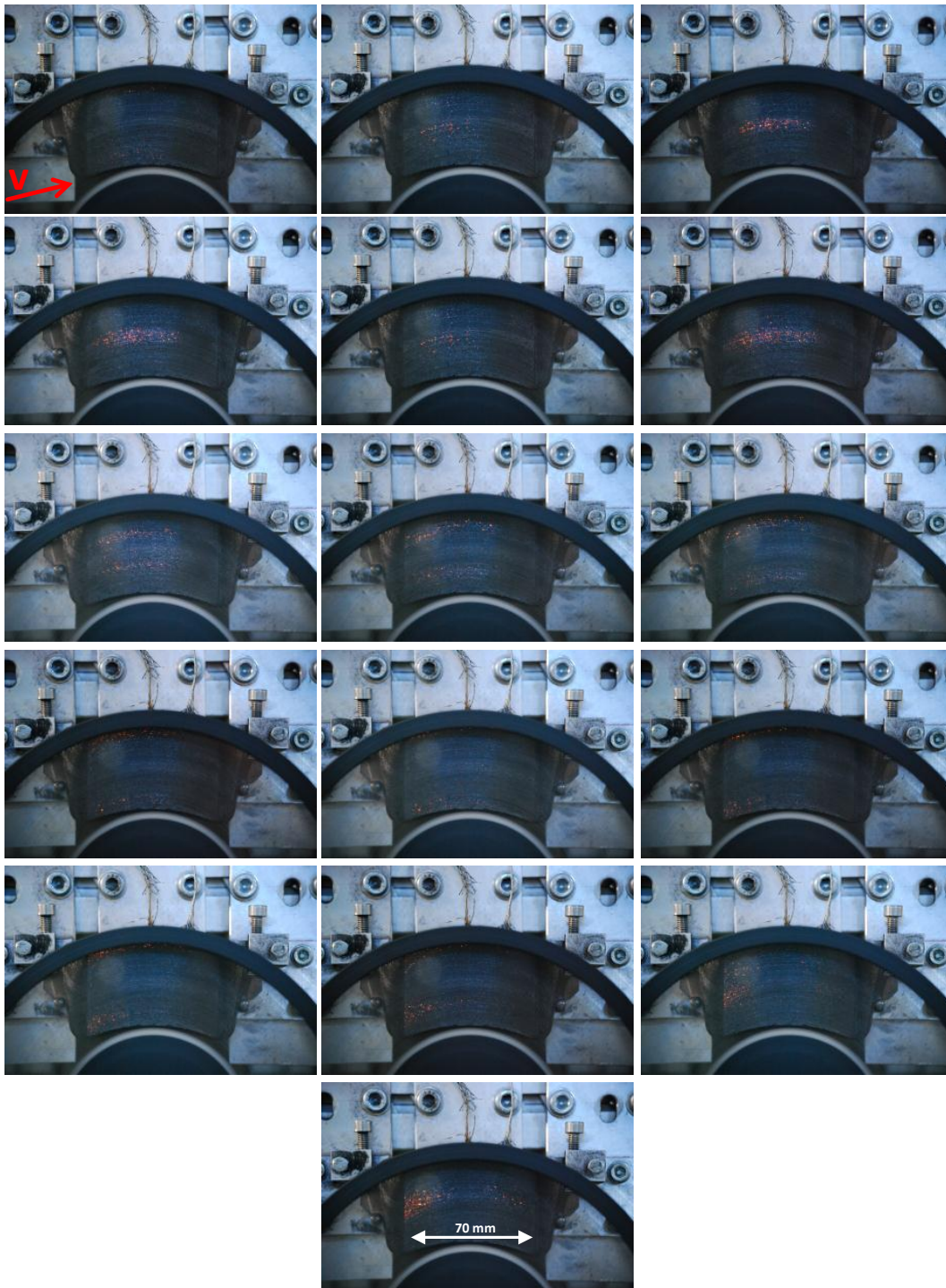


Abb. 13.41: Initialverhalten der TEI, VGS-ECE-kf (Schleppbremsung)

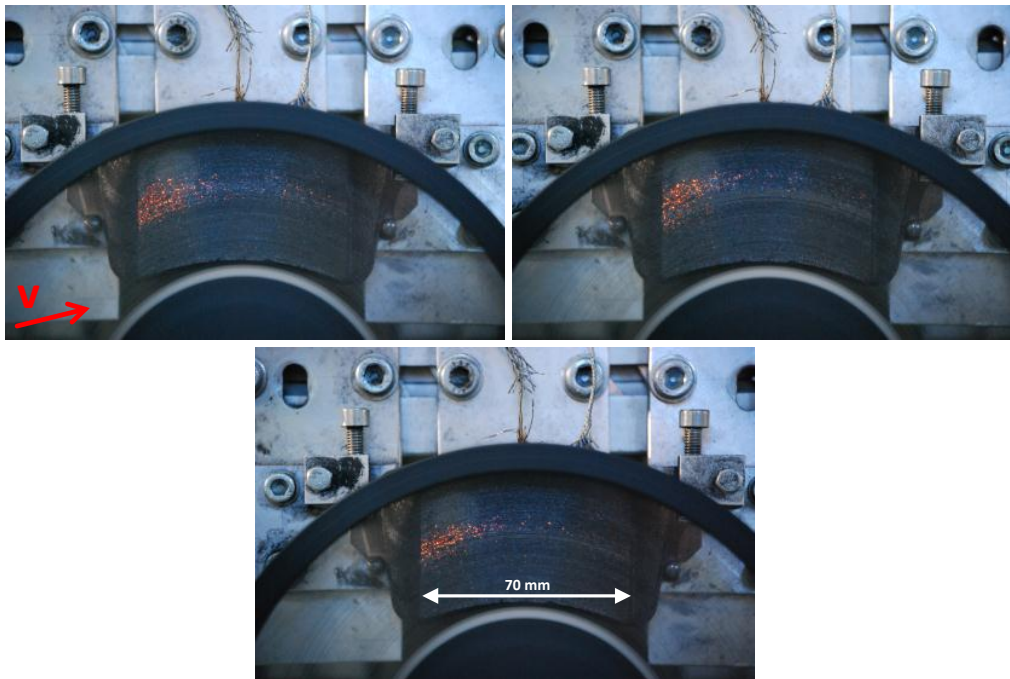


Abb. 13.42: Vergleich der maximalen TEI innerhalb einer Schleppbremsung, bei Minute 16 (links), 28 (rechts) und 40 (unten), VGS – ECE-kf

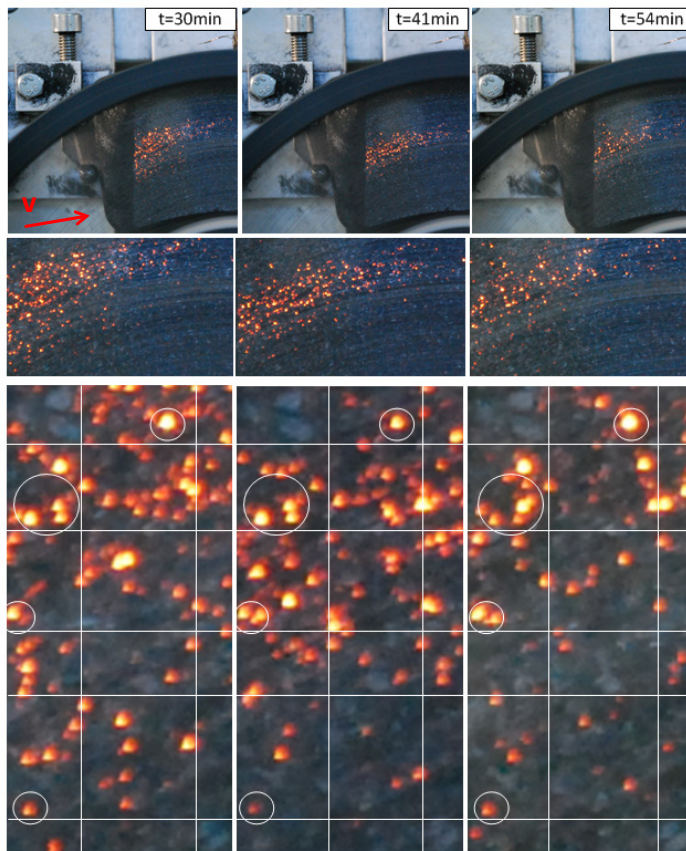


Abb. 13.43: Darstellung sich wiederholender Hitzefflecken (mittels Kreisen markiert)

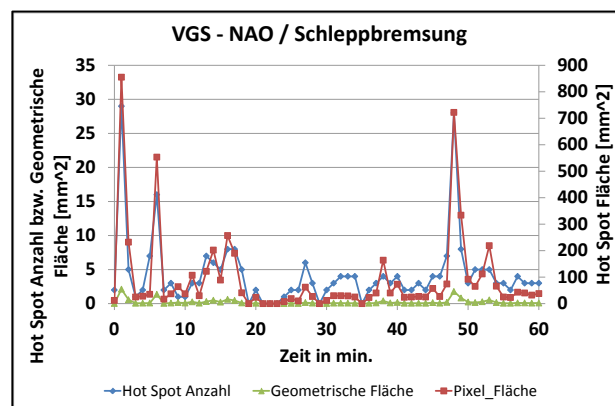


Abb. 13.44: Verhalten von Hot Spot Anzahl, -Fläche sowie geometrischer Fläche, Schleppbremsung, VGS – NAO

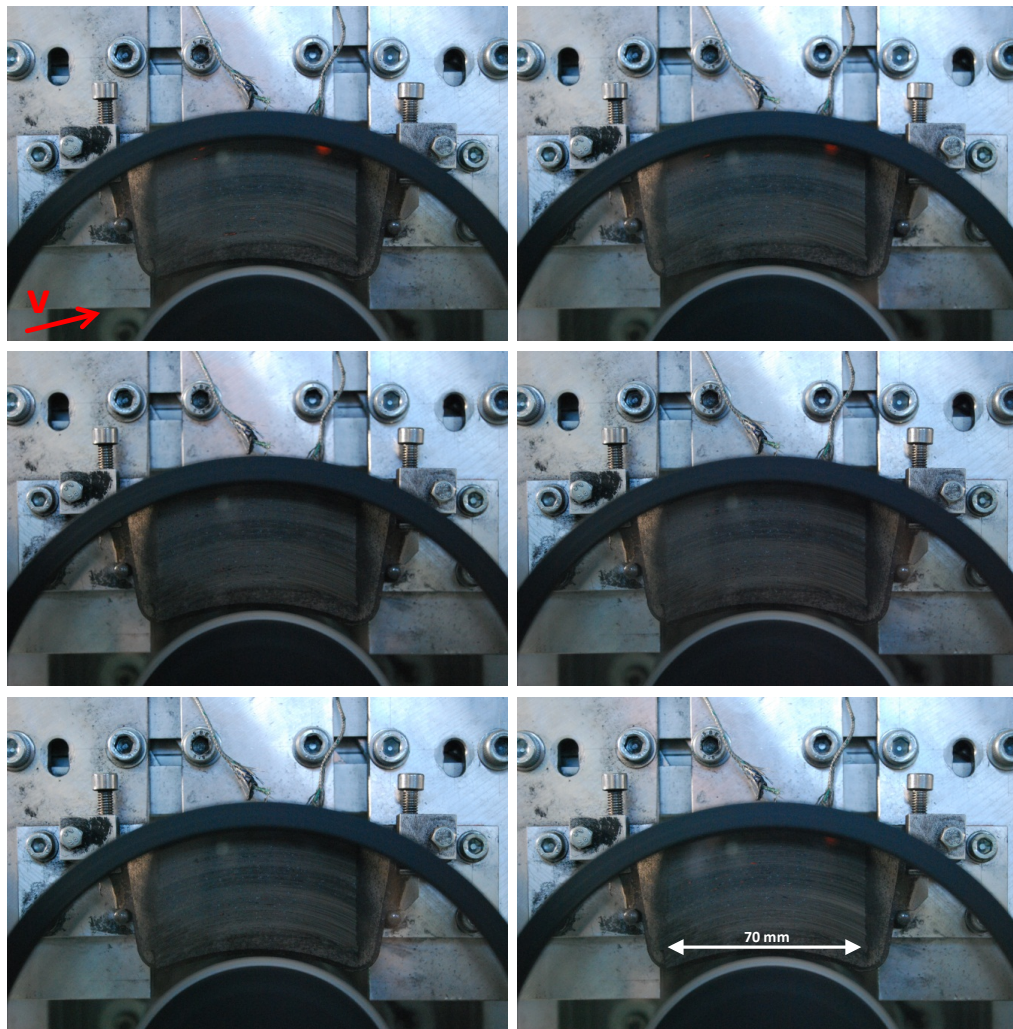


Abb. 13.45: Initialverhalten der TEI, VGS – NAO (Schleppbremse)

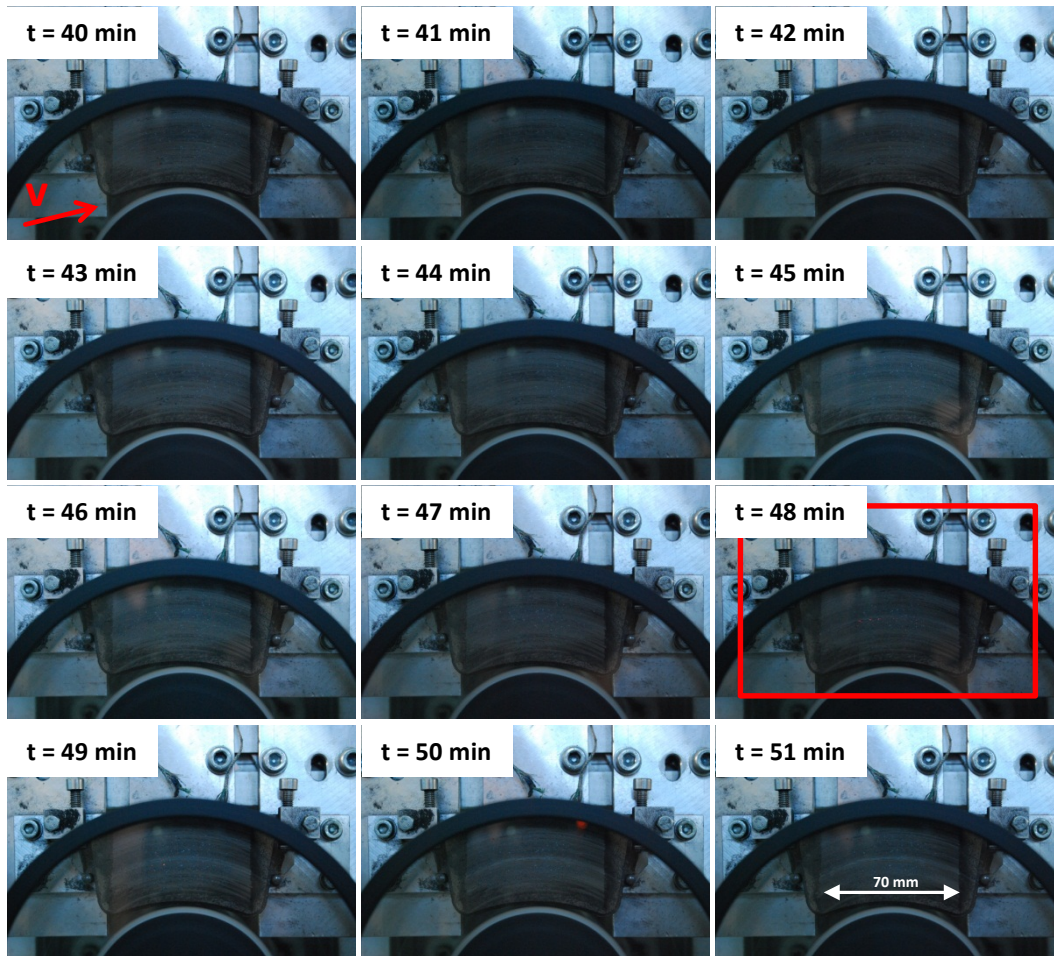


Abb. 13.46: Verlauf der TEI für eine Periode, VGS – NAO (Minute 40 bis 51, Maximum bei Minute 48 – rot markiert)

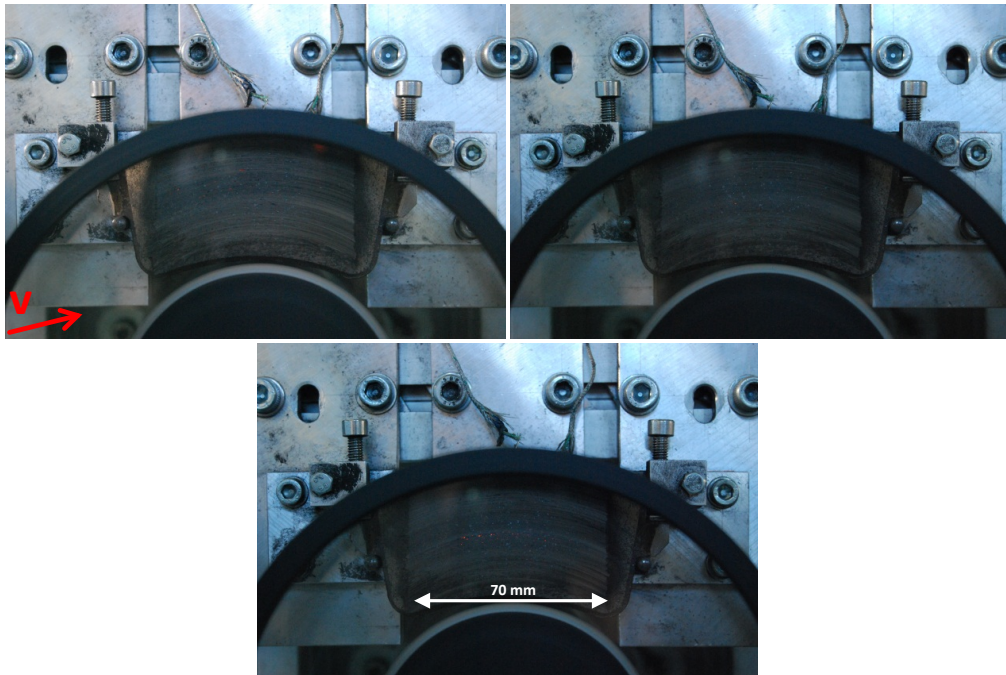


Abb. 13.47: Vergleich der maximalen TEI innerhalb einer Schleppbremsung, bei Minute 6 (links), 27 (rechts) und 48 (unten), VGS – NAO

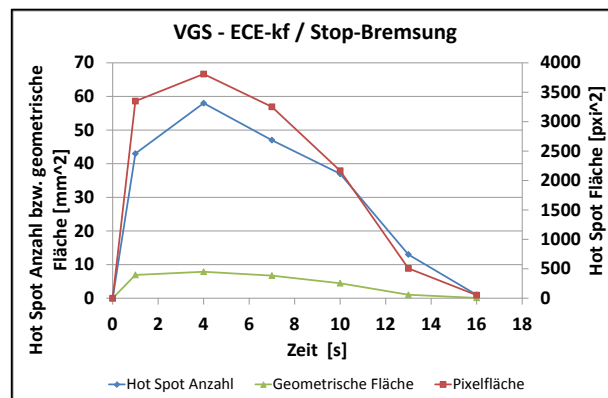


Abb. 13.48: Verhalten von Hot Spot Anzahl, -Fläche sowie geometrischer Fläche, Stop-Bremung, VGS – ECE-kf

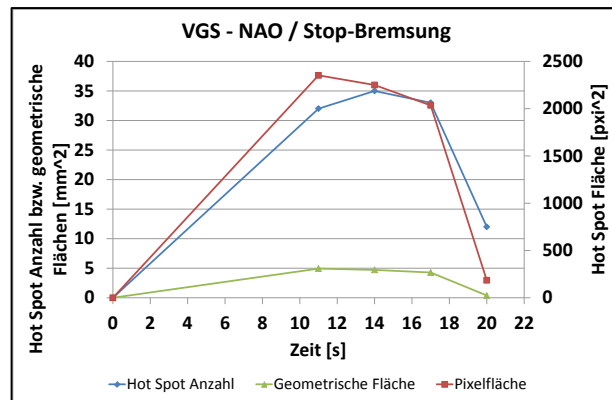


Abb. 13.49: Verhalten von Hot Spot Anzahl, -Fläche sowie geometrischer Fläche, Stop-Bremung, VGS – NAO

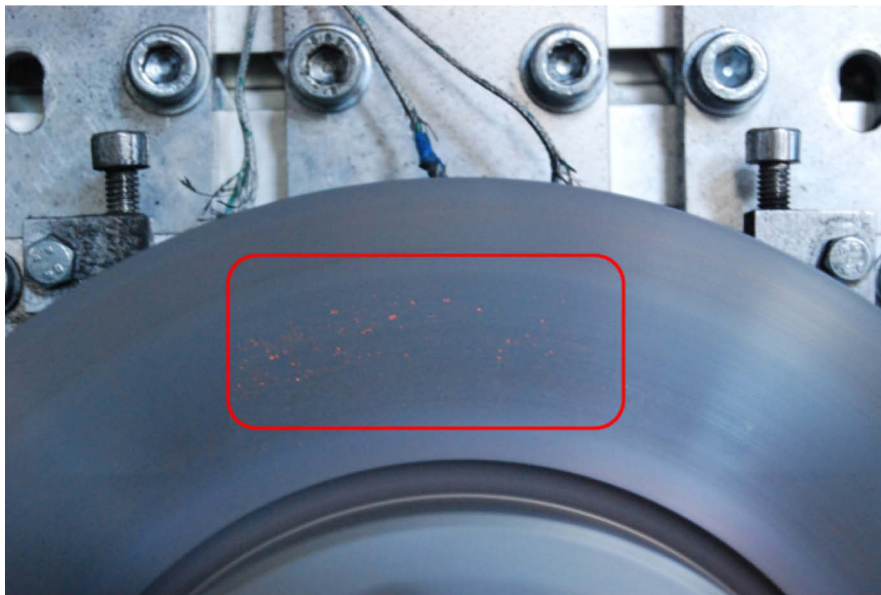


Abb. 13.50: Hitzeflecken bei einer SGG (gegen ECE-kf Belag) – markierter Bereich

13.4 Tribologische und physikalisch / chemische Untersuchungen

13.4.1 Charakterisierungen des Reibverhaltens

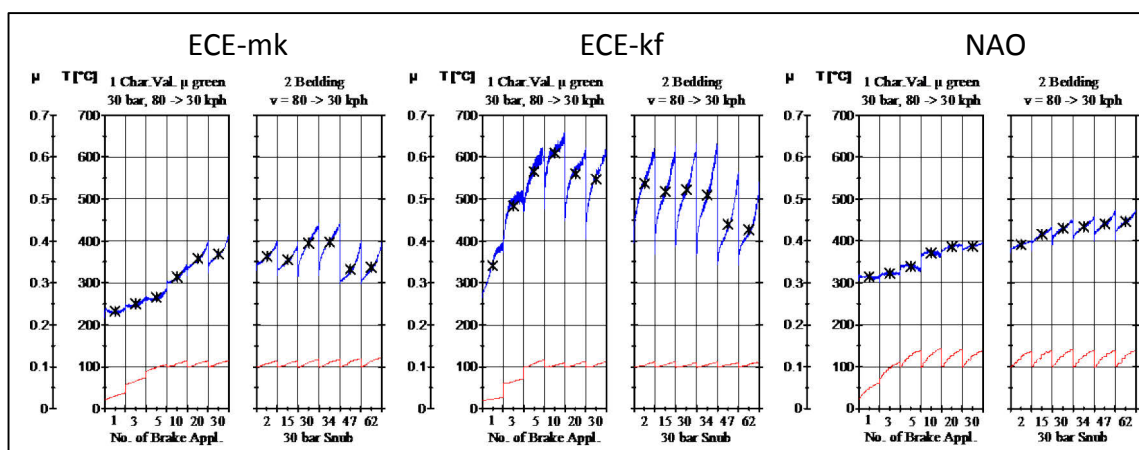


Abb. 13.51: Temperatur- und Reibwertverläufe des Beddings (AK Master)

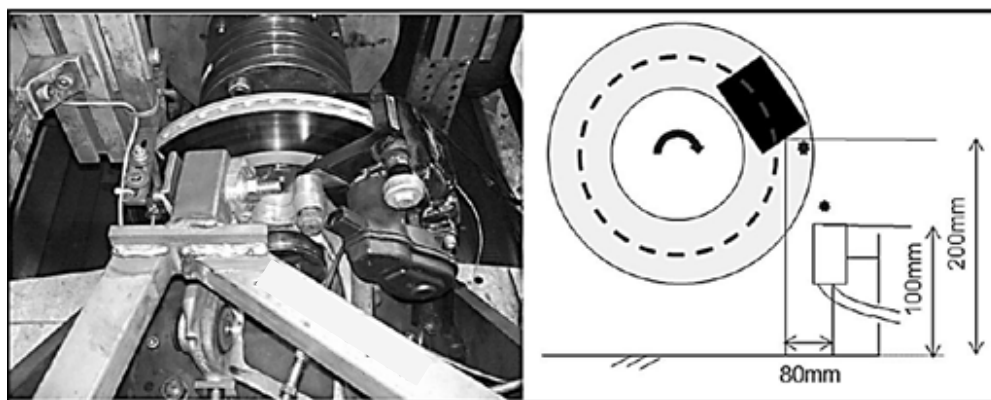


Abb. 13.52: Meßanordnung der Aerosolmeßeinheit im Rahmen der AK Master Prüfungen (Referenzbremse)

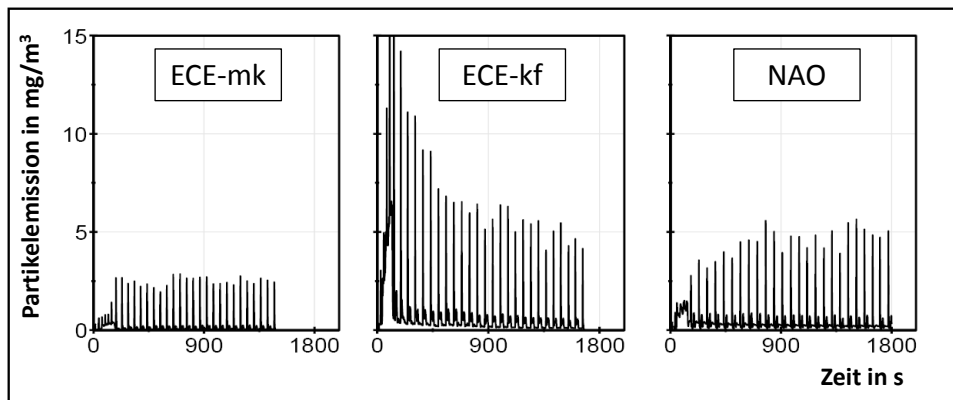


Abb. 13.53: Partikelemission während des Beddings (AK Master)

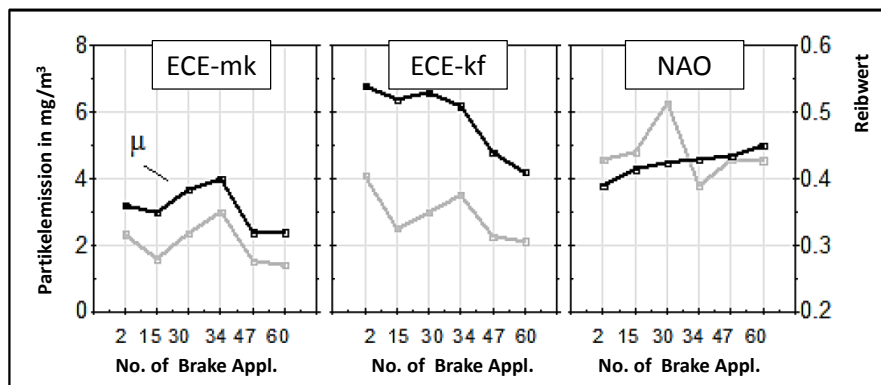


Abb. 13.54: Korrelation zwischen Reibwert und Partikelemission während des Beddings (AK Master)

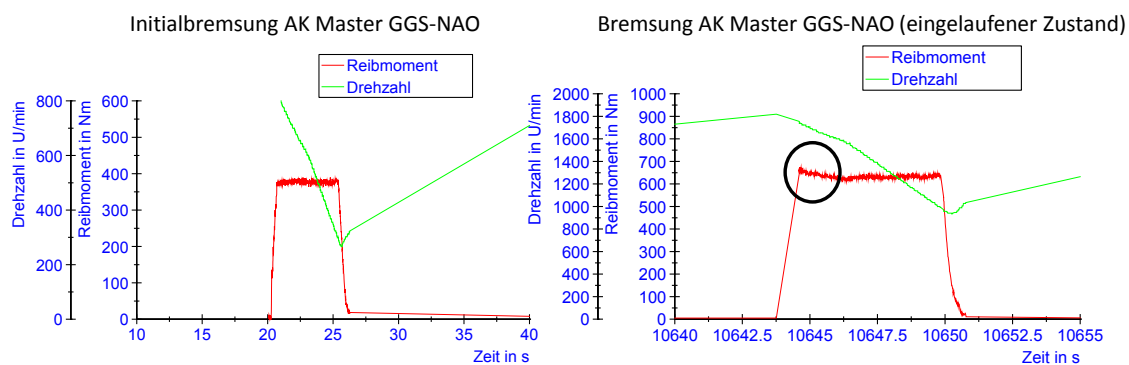


Abb. 13.55: Momentenverläufe im grünen (links) und eingelaufenen (rechts) Zustand (Markierung: Momentenüberhöhung)

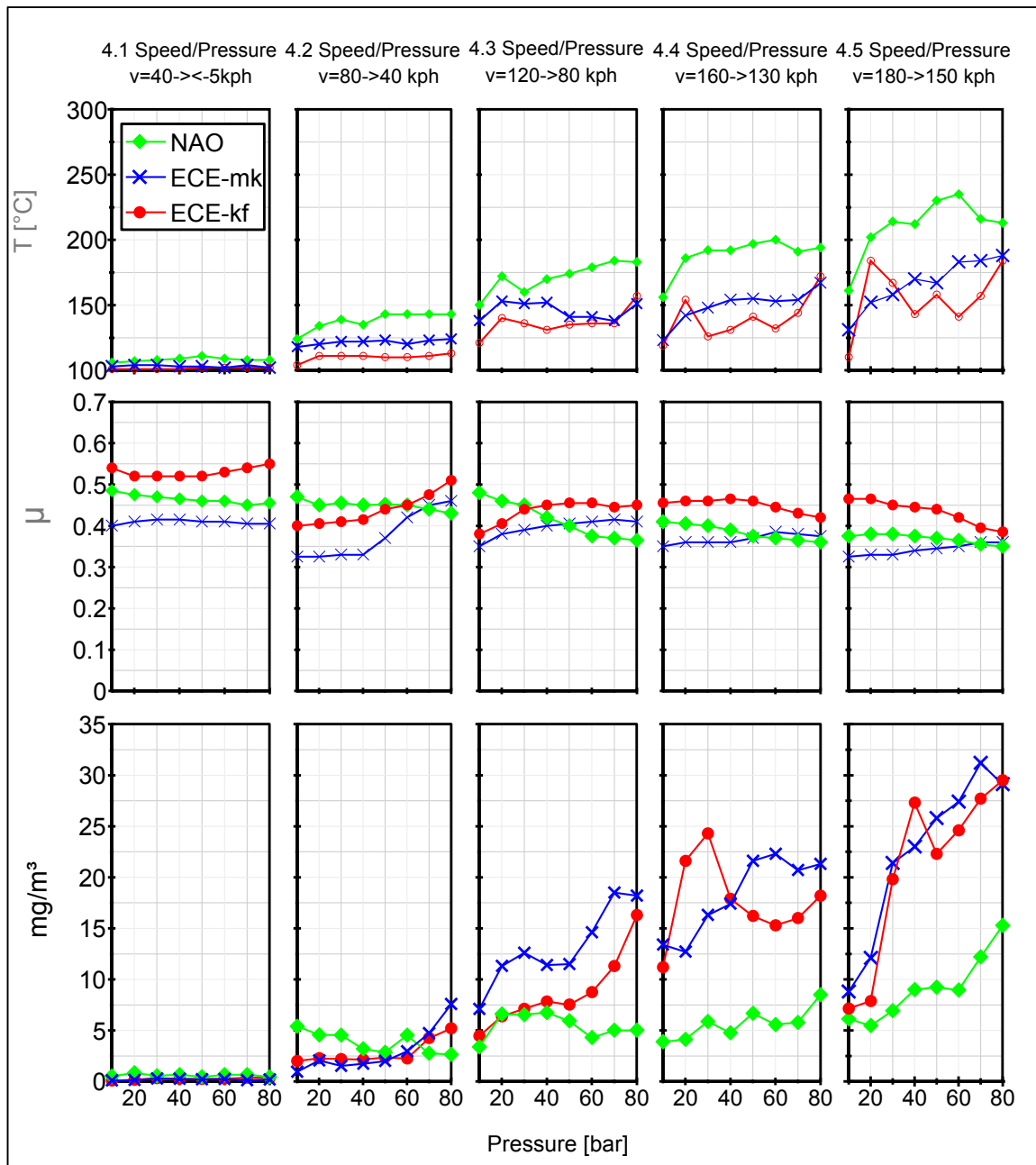


Abb. 13.56: Ergebnisse des Zyklus 4 des AK Master in Bezug auf Temperatur, Reibwert und Partikelemission

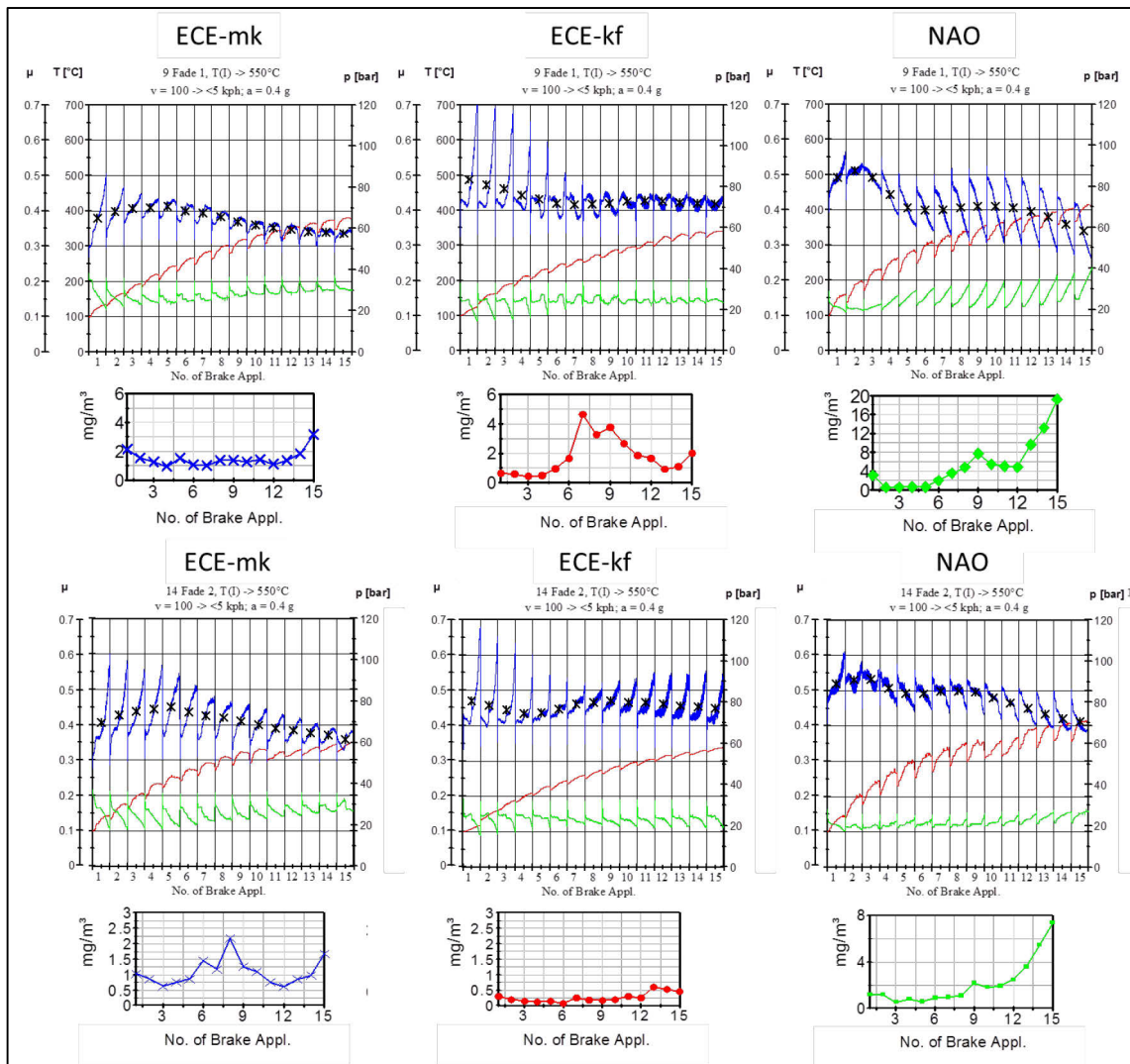


Abb. 13.57: Ergebnisse der Fadingblöcke 1 und 2 des AK Master in Bezug auf Temperatur, Reibwert und Partikelemission

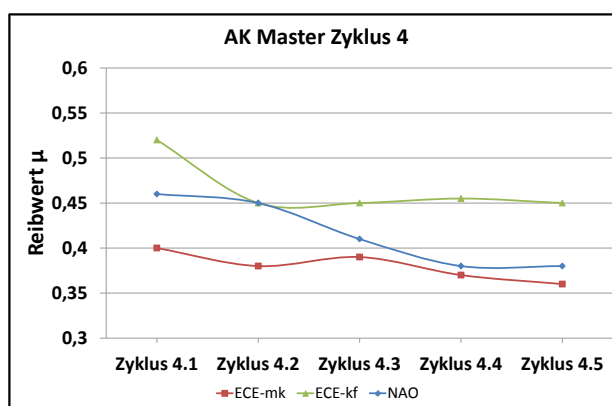


Abb. 13.58: Darstellung der gemittelten Reibwerte für den Zyklus 4 des AK Master

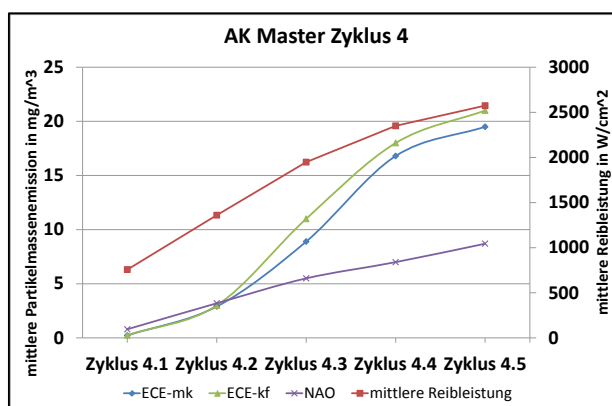


Abb. 13.59: Vergleich von mittlerer Partikelemission und Reibleistung für Zyklus 4 des AK Master

13.4.2 REM- / EDX-Untersuchungen

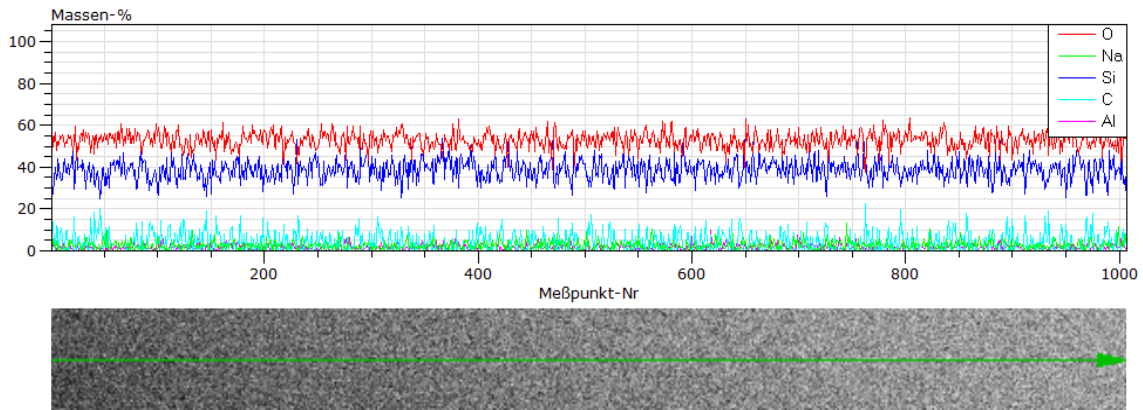


Abb. 13.60: Linescan Borosilikatscheibe (VGS, grün)

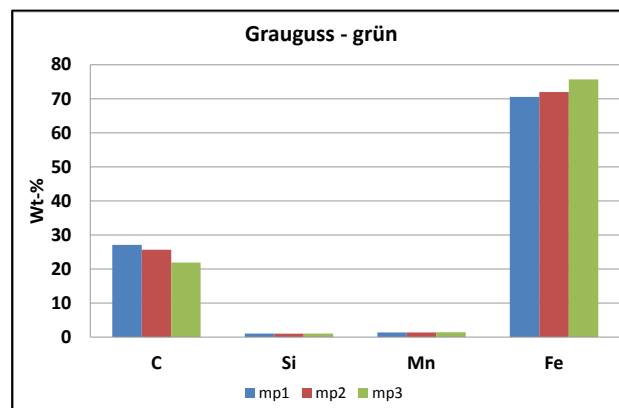


Abb. 13.61: EDX-Analysen GGS (grün) an 3 Meßpunkten bei 100x

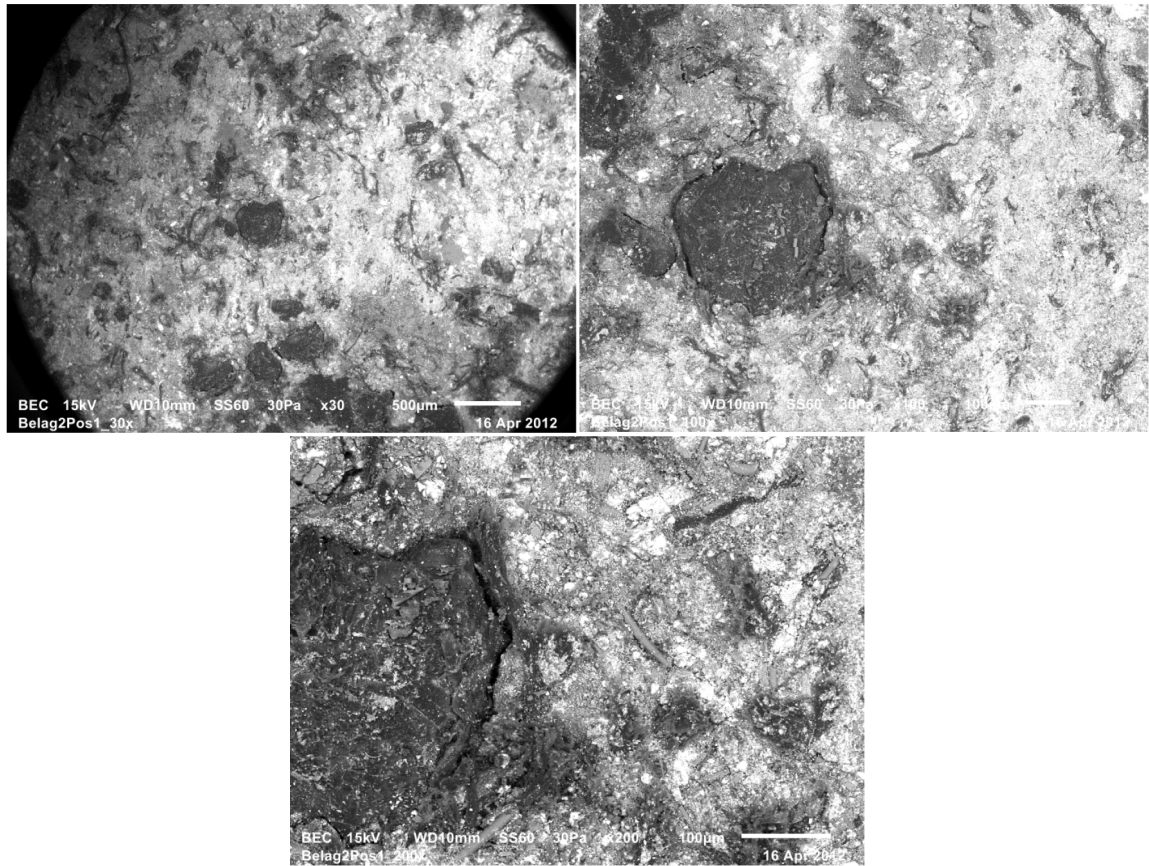


Abb. 13.62: REM-Aufnahme NAO-Belag (grün), für 30x, 100x und 200x

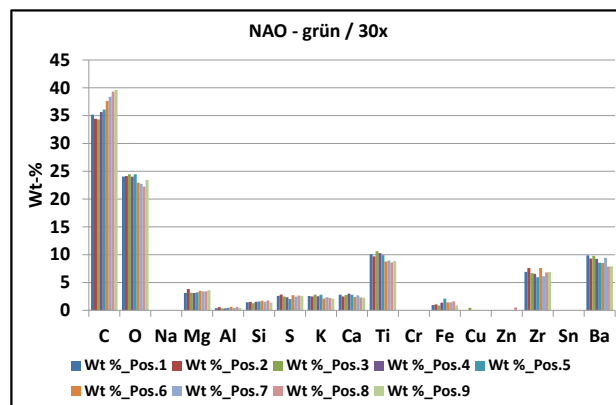


Abb. 13.63: Elementverteilung eines NAO-Belages (grün) für 9 Meßpunkte bei 30x

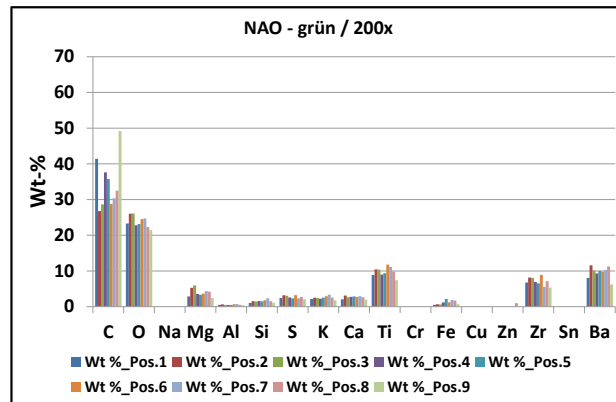


Abb. 13.64: Elementverteilung eines NAO-Belages (grün) für 9 Meßpunkte bei 200x

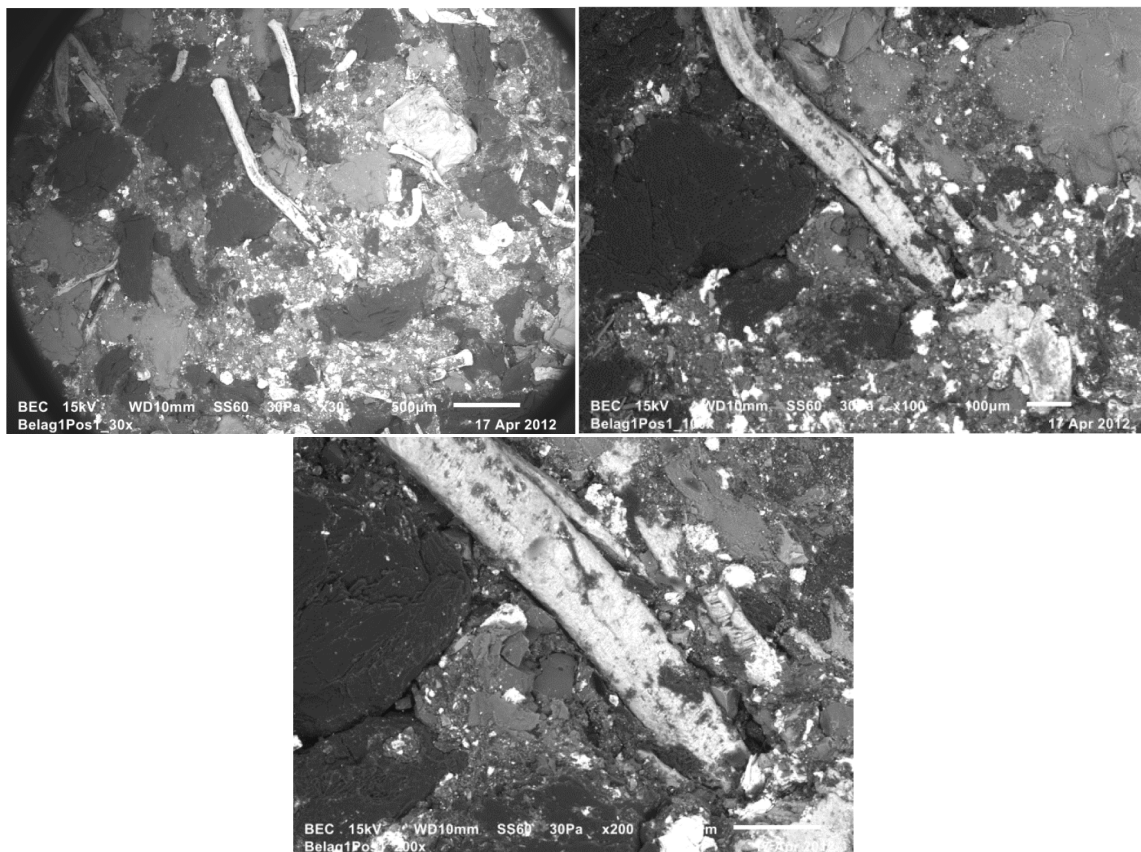


Abb. 13.65: REM-Aufnahme ECE-kf Belag (grün), für 30x, 100x und 200x

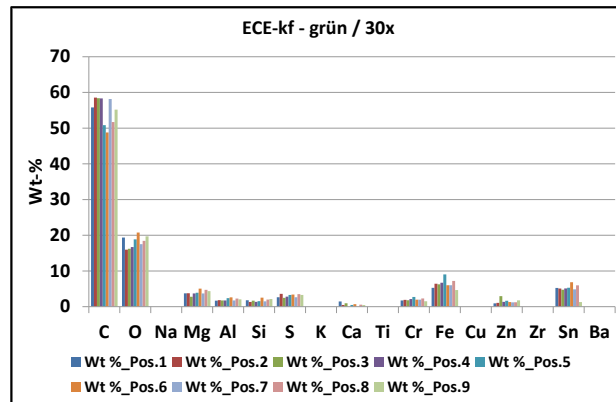


Abb. 13.66: Elementverteilung eines ECE-kf Belages (grün) für 9 Meßpunkte bei 30x

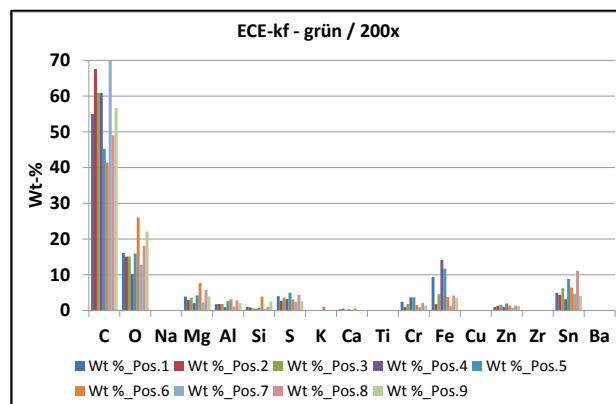


Abb. 13.67: Elementverteilung eines ECE-kf Belages (grün) für 9 Meßpunkte bei 200x

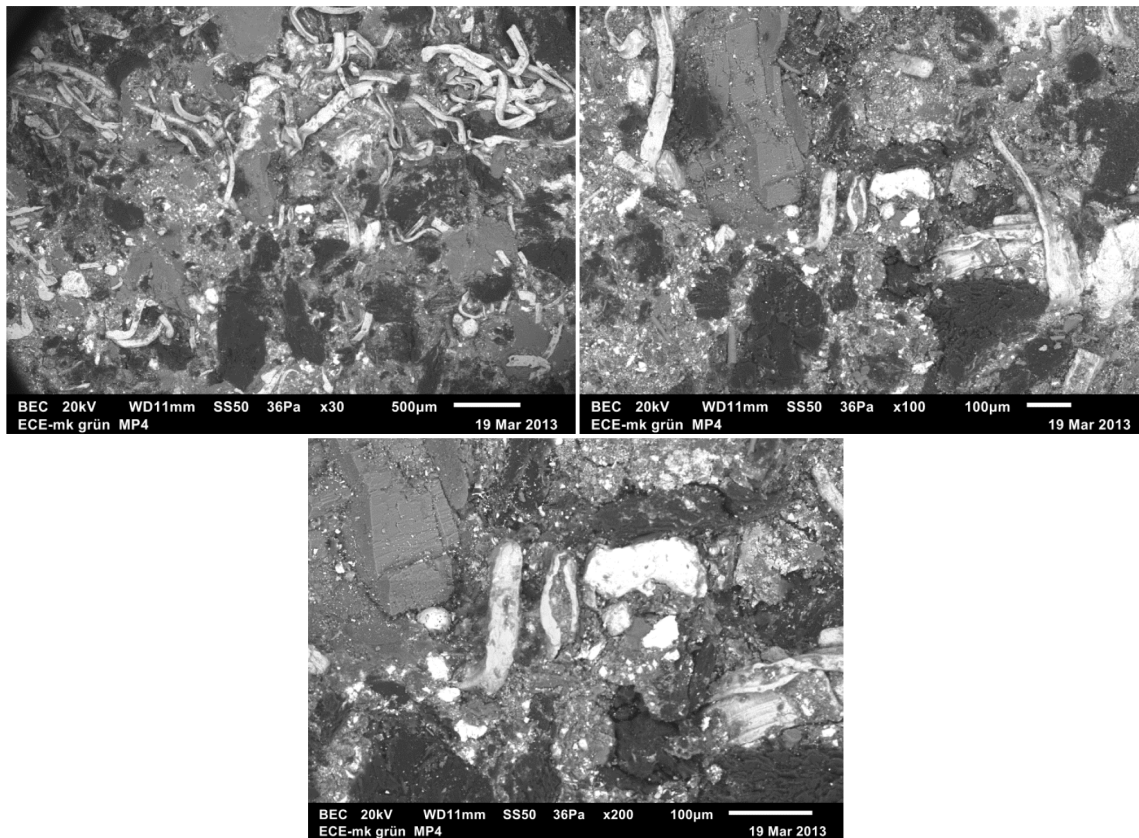


Abb. 13.68: REM-Aufnahme ECE-mk Belag (grün), für 30x, 100x und 200x

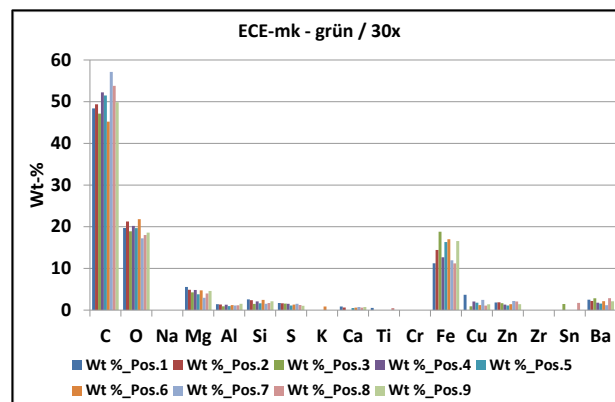


Abb. 13.69: Elementverteilung eines ECE-mk Belages (grün) für 9 Meßpunkte bei 30x

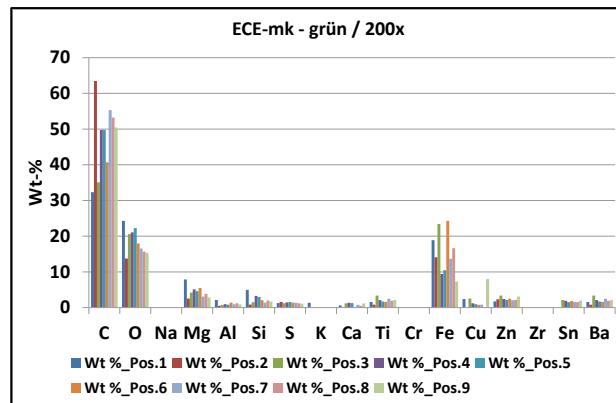


Abb. 13.70: Elementverteilung eines ECE-mk Belages (grün) für 9 Meßpunkte bei 200x

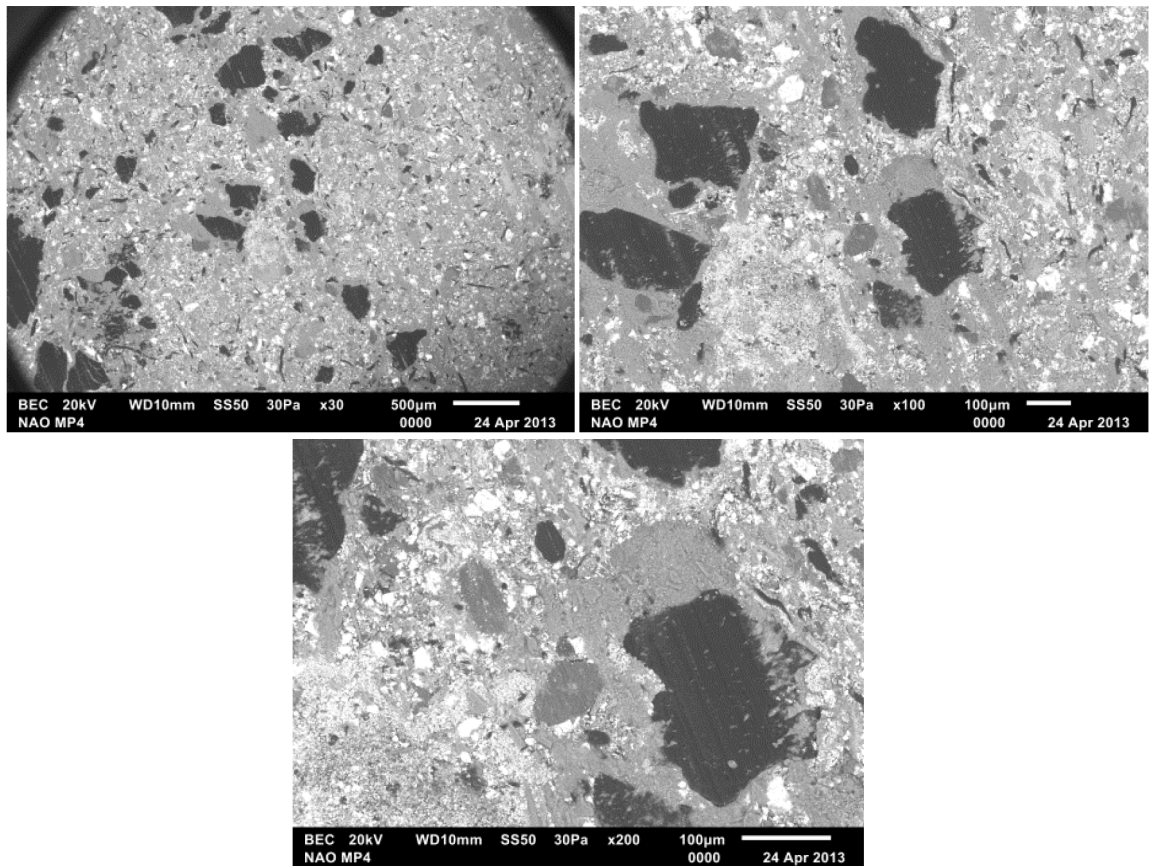


Abb. 13.71: REM-Aufnahme eines NAO-Belages nach Bedding und Abblasen, gegen VGS gebremst, für 30x, 100x und 200x

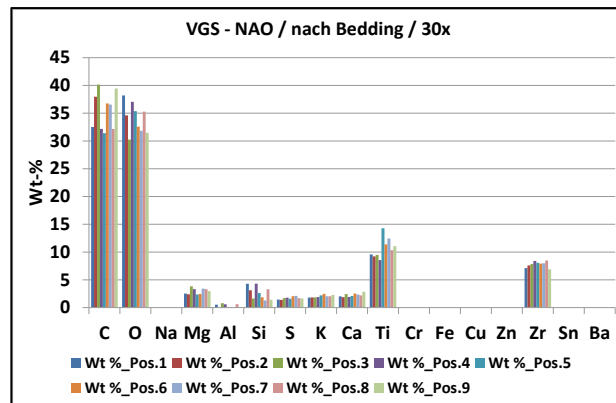


Abb. 13.72: Elementverteilung eines NAO-Belages (nach Bedding gegen eine VGS) für 9 Meßpunkte bei 30x

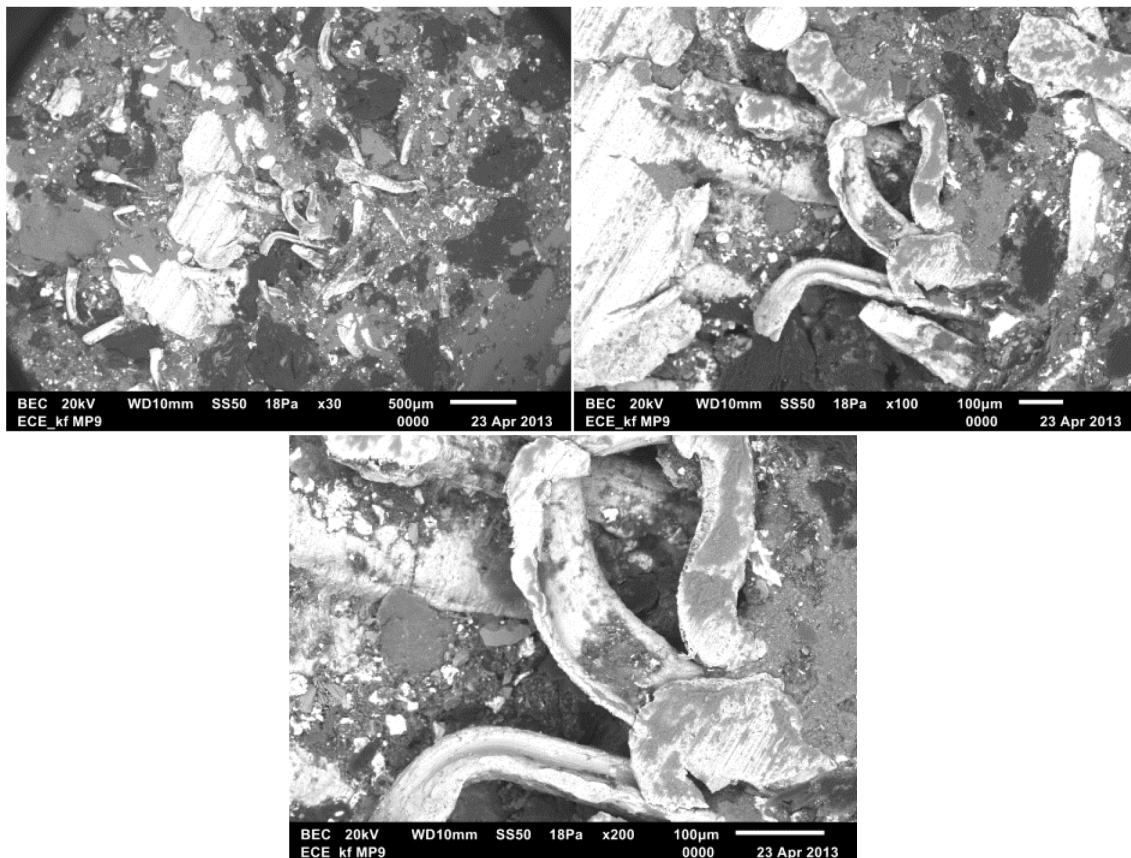


Abb. 13.73: REM-Aufnahme eines ECE-kf Belages nach Bedding und Abblasen, gegen VGS gebremst, für 30x, 100x und 200x

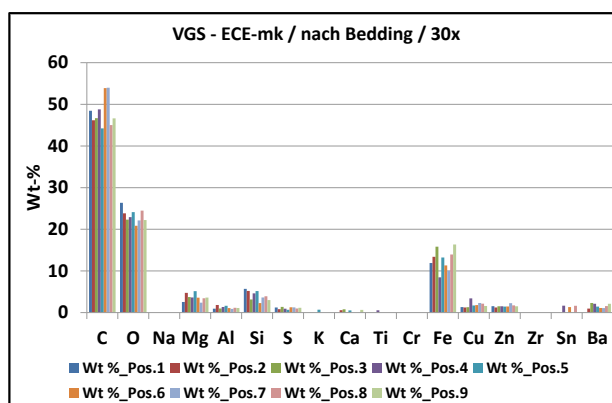


Abb. 13.74: Elementverteilung eines ECE-kf Belages (nach Bedding gegen eine VGS) für 9 Meßpunkte bei 30x

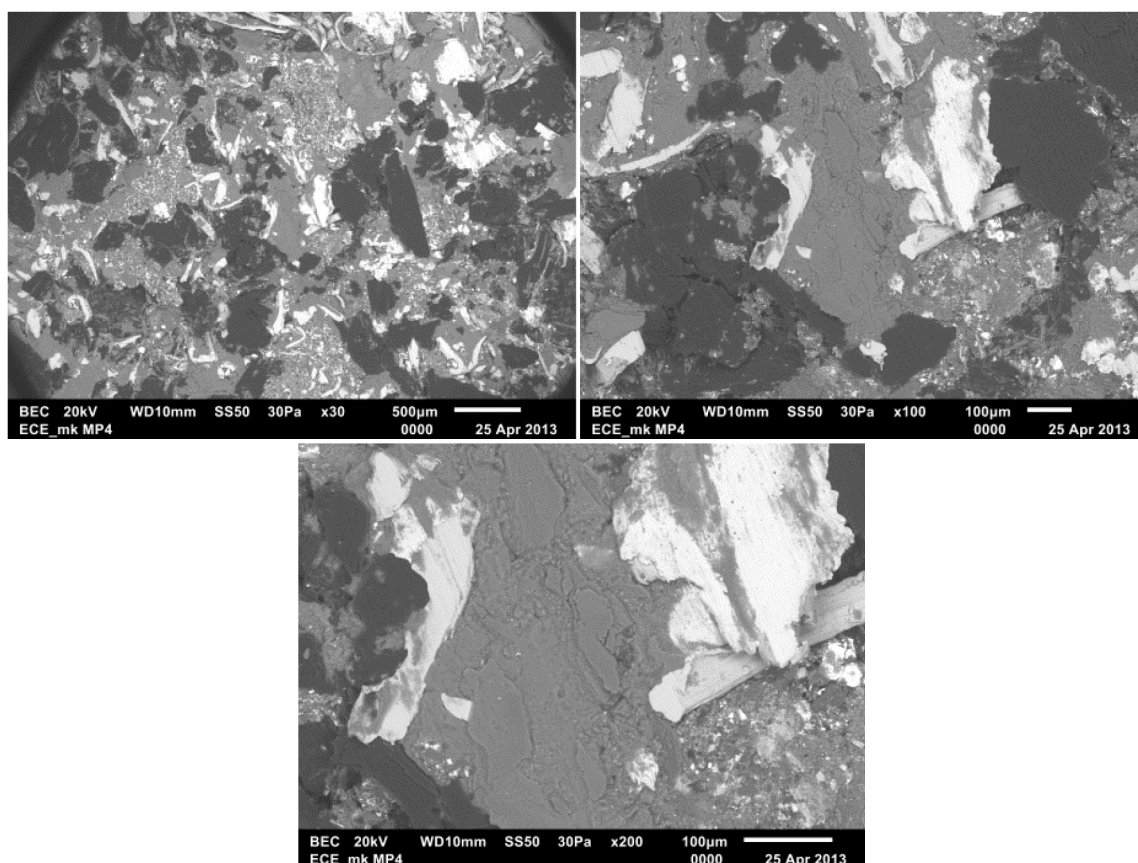


Abb. 13.75: REM-Aufnahme eines ECE-mk Belages nach Bedding und Abblasen, gegen VGS gebremst, für 30x, 100x und 200x

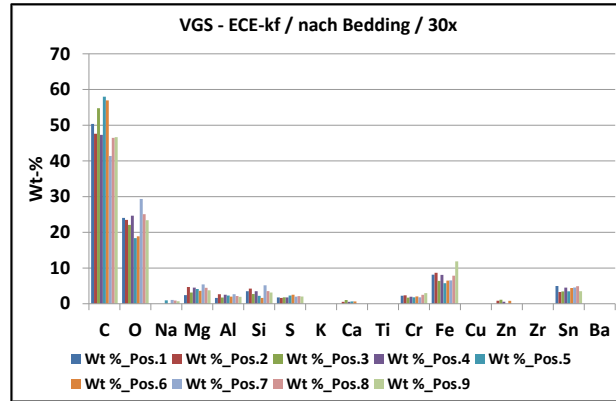


Abb. 13.76: Elementverteilung eines ECE-mk Belages (nach Bedding gegen eine VGS) für 9 Meßpunkte bei 30x

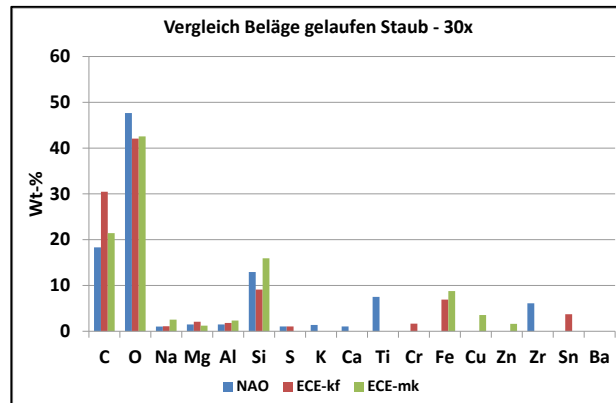


Abb. 13.77: Elementverteilung von Staubproben (nach Bedding gegen eine VGS) bei 30x

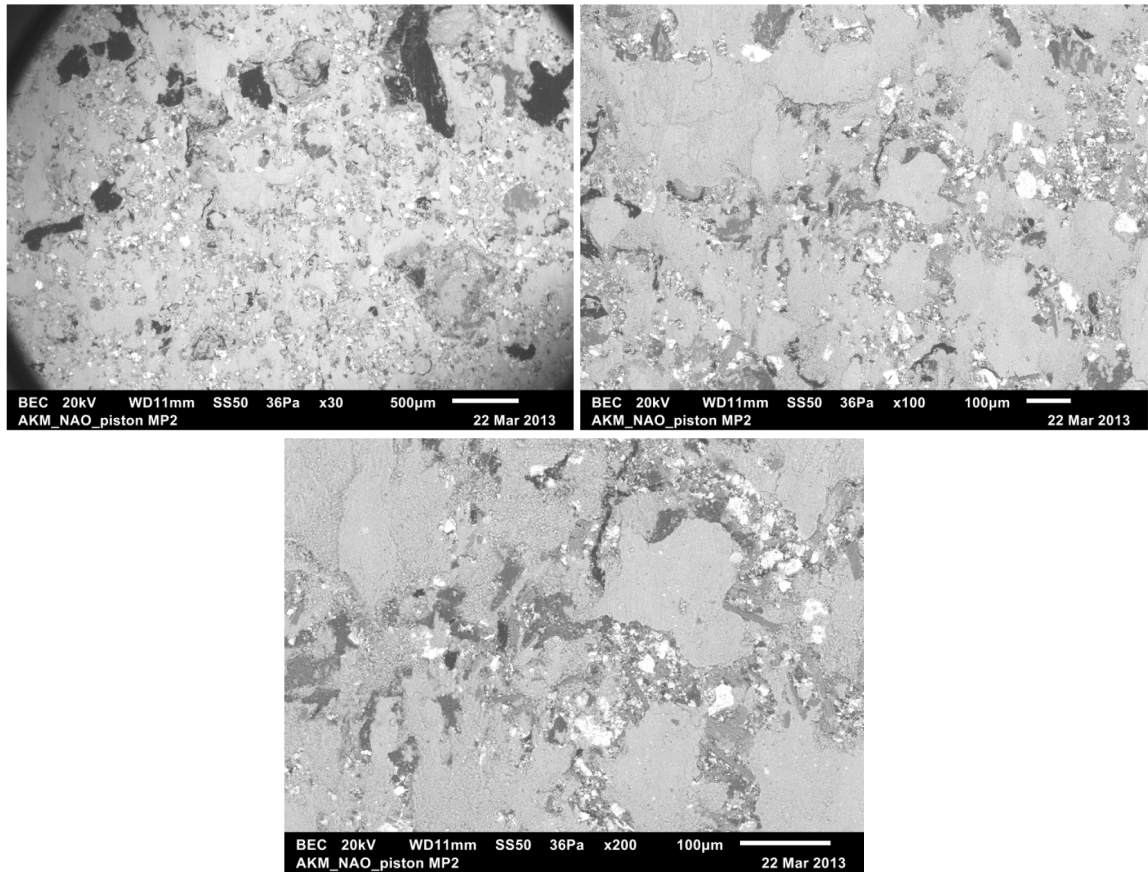


Abb. 13.78: REM-Aufnahme eines NAO-Belages nach einem AK Master, für 30x, 100x und 200x

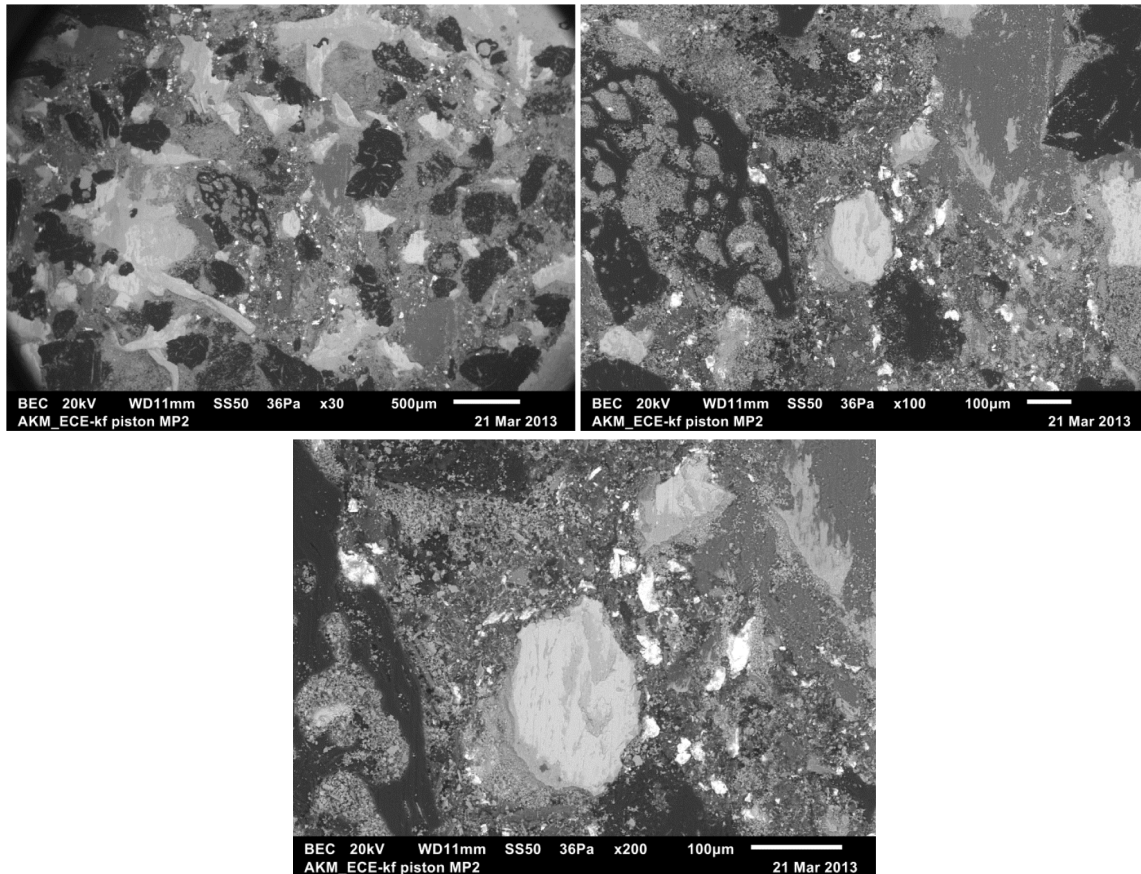


Abb. 13.79: REM-Aufnahme eines ECE-kf Belages nach einem AK Master, für 30x, 100x und 200x

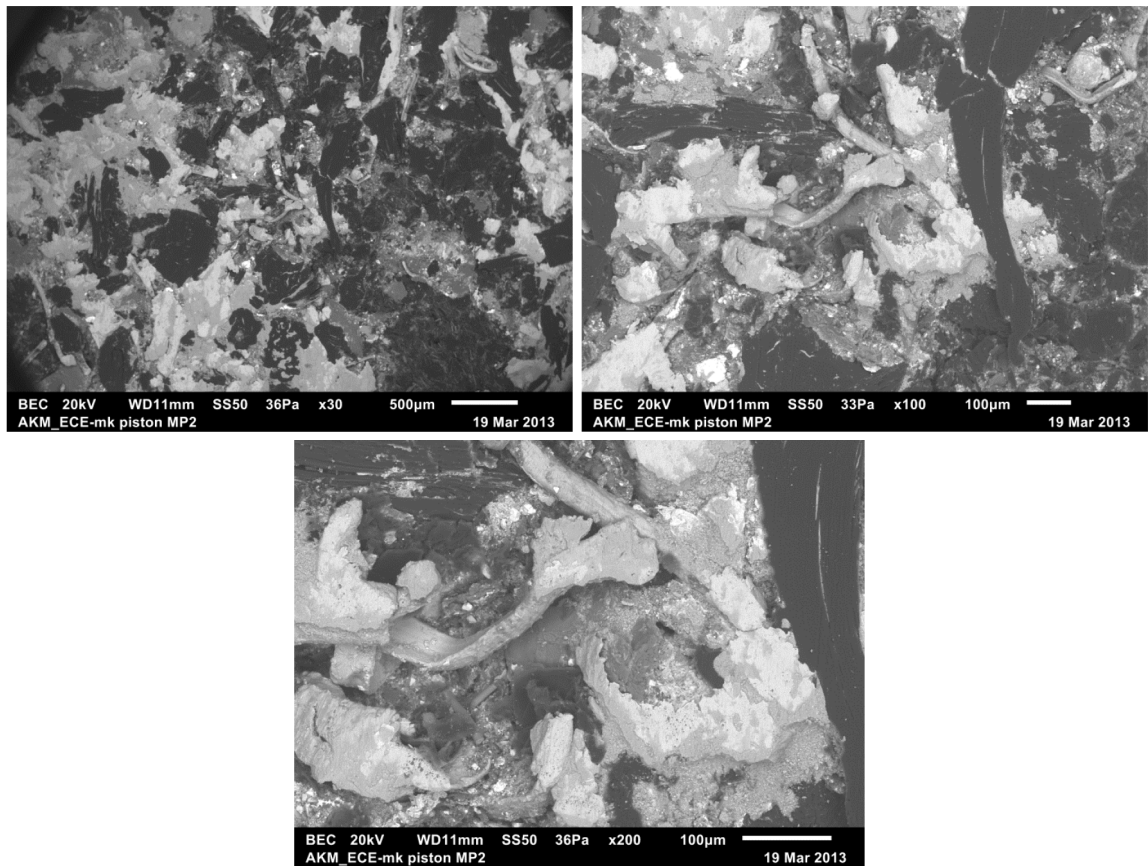


Abb. 13.80: REM-Aufnahme eines ECE-mk Belages nach einem AK Master, für 30x, 100x und 200x

13.4.3 Topographie-Charakterisierungen



Abb. 13.81: Mikroskopaufnahmen 30x nach Bedding und vor dem Abblasen von NAO (links), ECE-kf (Mitte) und ECE-mk (rechts)

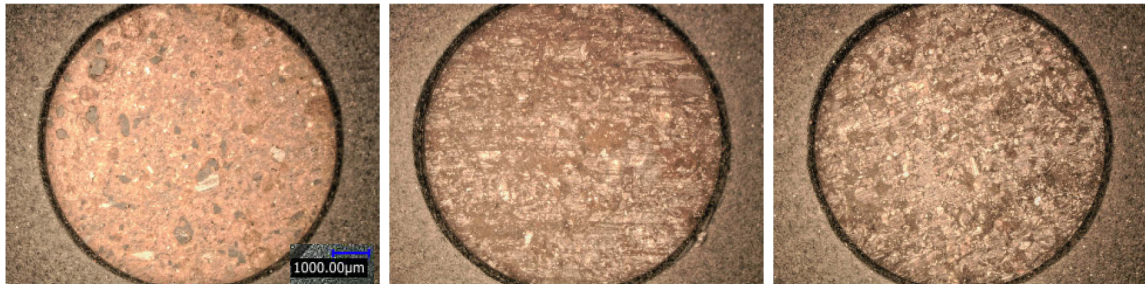


Abb. 13.82: Mikroskopaufnahmen 30x nach Bedding und Abblasen von NAO (links), ECE-kf (Mitte) und ECE-mk (rechts)

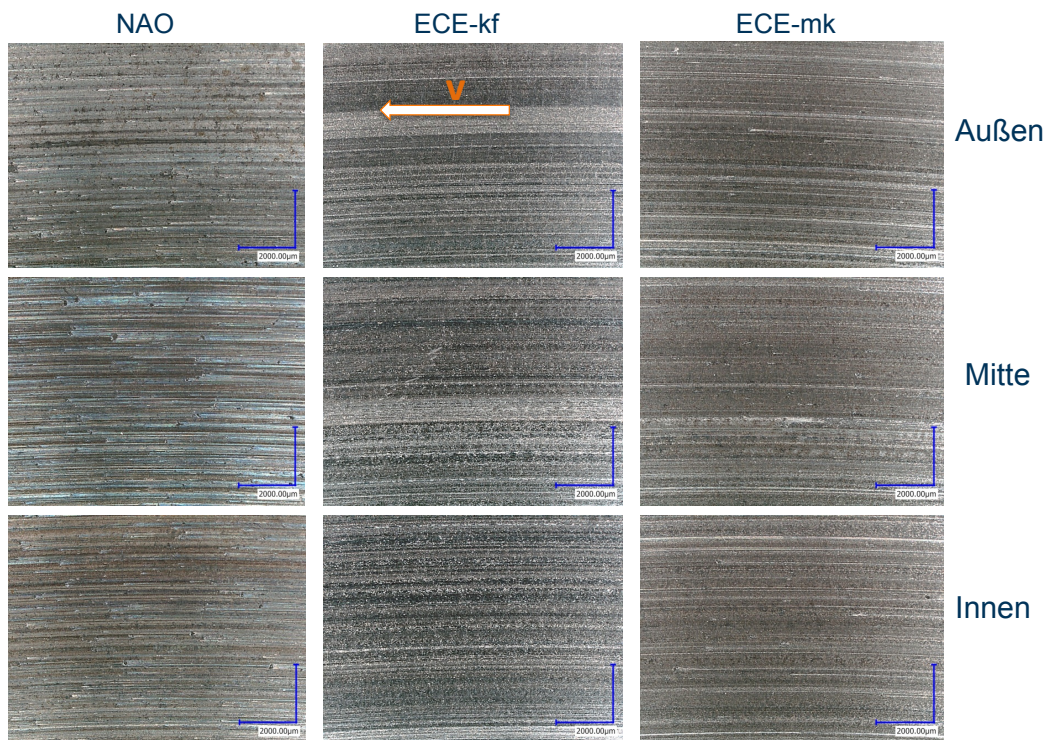


Abb. 13.83: lichtmikroskopische Aufnahmen der GGS nach dem AK Master, Vergrößerung 30x



Abb. 13.84: Mikroskopaufnahmen 30x nach AK Master und Abblasen von NAO (links), ECE-kf (Mitte) und ECE-mk (rechts)

13.4.4 Kompressibilitätsuntersuchungen

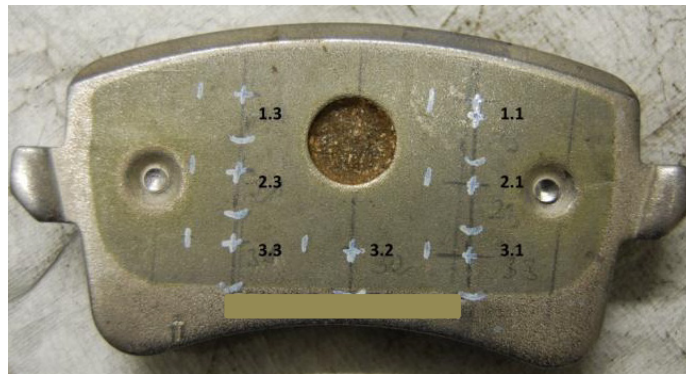


Abb. 13.85: NAO-Belag mit entferntem Shim und Markierung der Stempelpositionen für lokale Kompressibilitätsmessungen

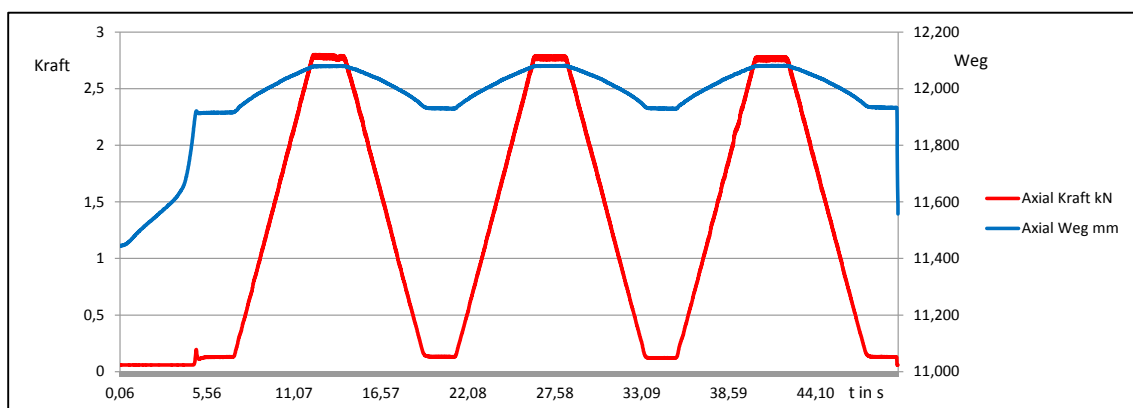


Abb. 13.86: zeitliche Verläufe der Prüfprozedur für Kraft und Weg

13.4.5 Porositätscharakterisierungen

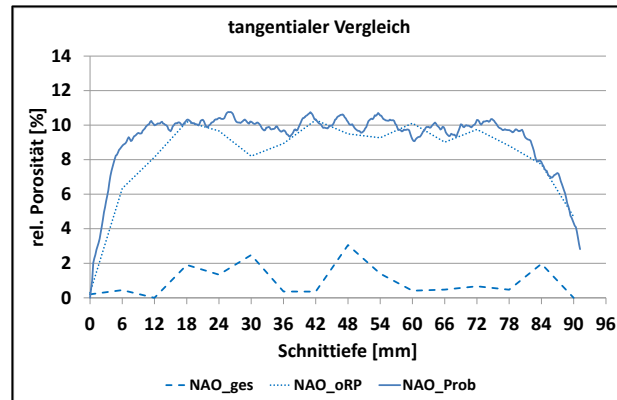


Abb. 13.87: Vergleich verschiedentlich präparierter Prüflinge (tangentiale Ausdehnung)

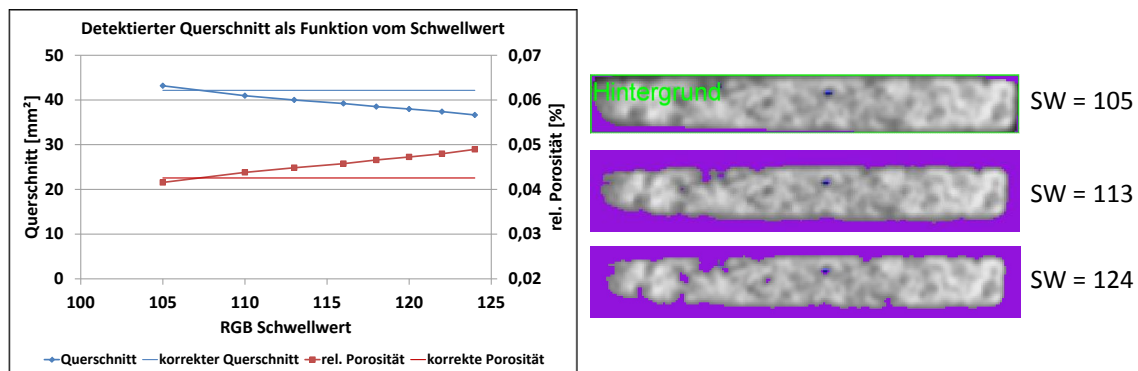


Abb. 13.88: Schwellwerteinfluß auf die Separierung der Reibmatrix

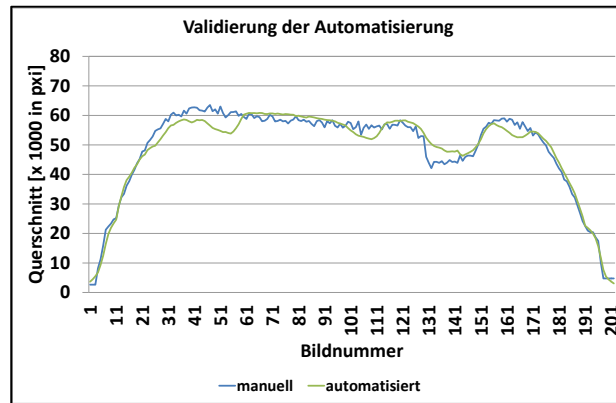


Abb. 13.89: Validierung der Güte der automatisierten Matrixerkennung (tangente Ausdehnung)

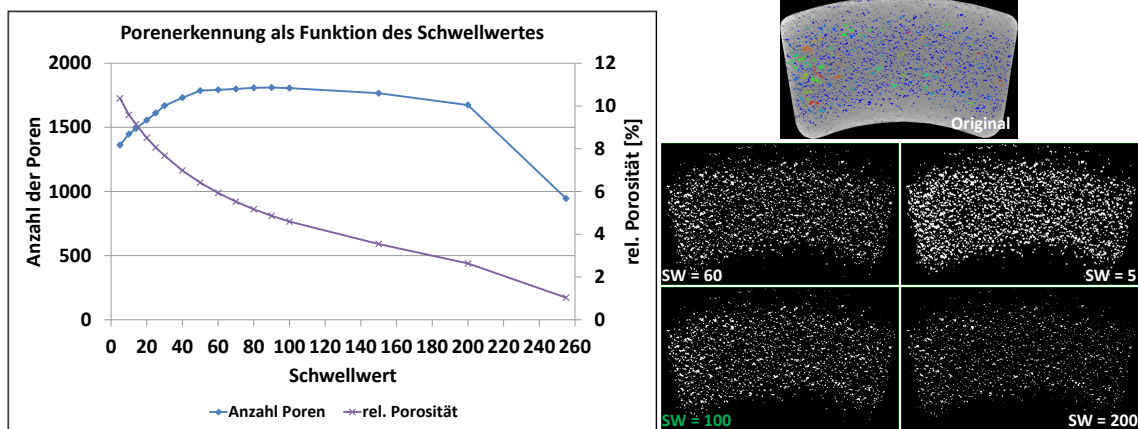


Abb. 13.90: Abhängigkeit der Porendetektion vom Schwellwert (axiale Ausdehnung)

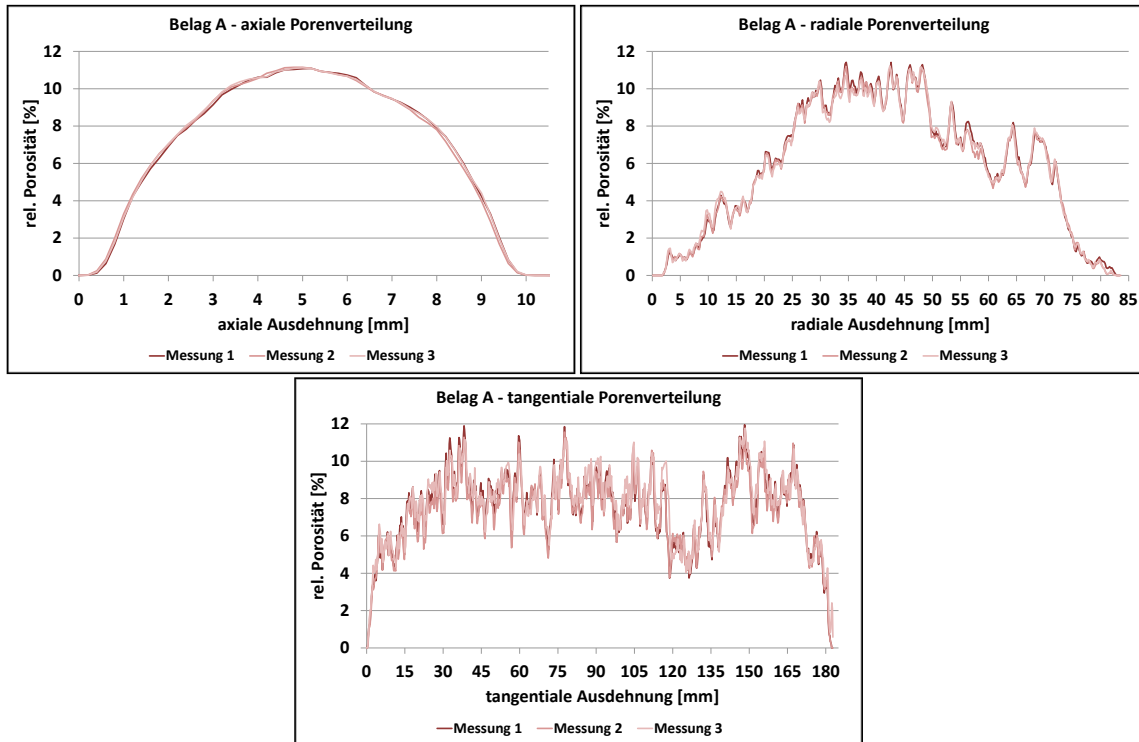


Abb. 13.91: CT-Wiederholungsmessungen eines Belages zum Nachweis der Reproduzierbarkeit

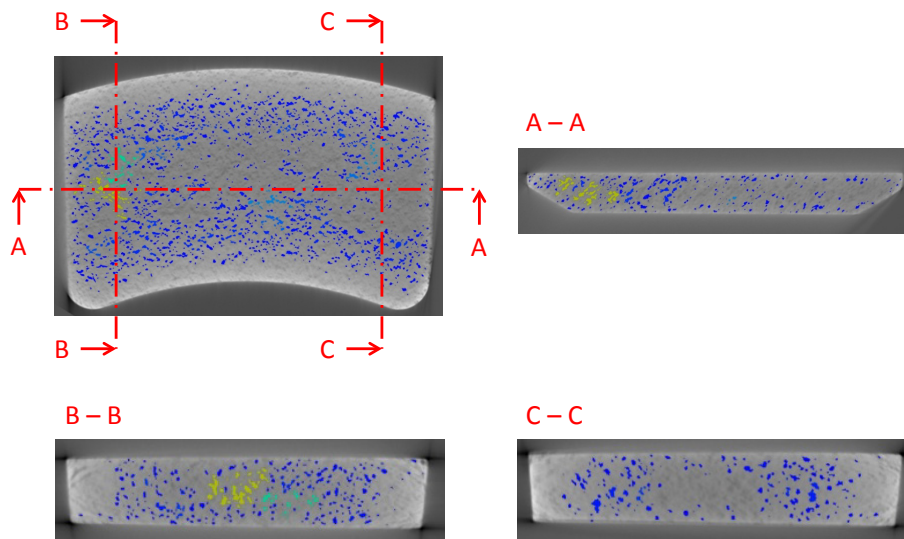


Abb. 13.92: ausgewählte Schnittbilder eines NAO-Belages zur Darstellung der Porositätsverteilung

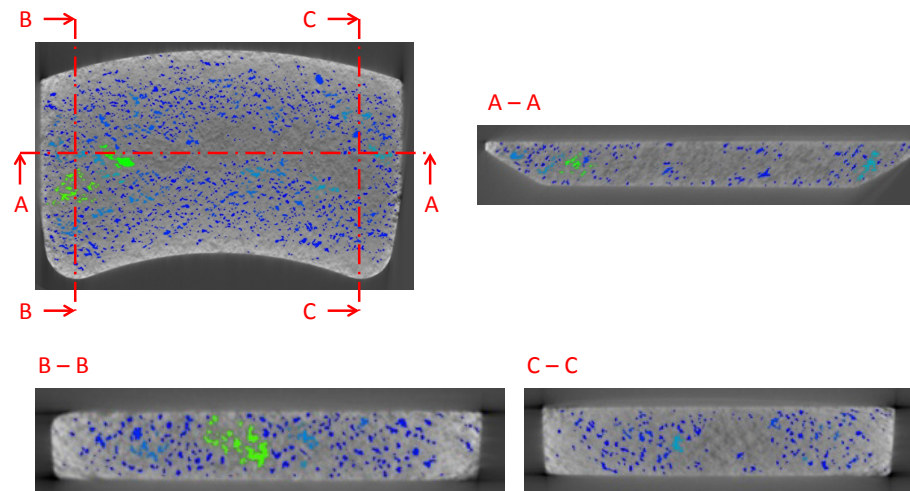


Abb. 13.93: ausgewählte Schnittbilder eines ECE-kf Belages zur Darstellung der Porositätsverteilung