

# **Wirkungskette der Entstehung von Hotspots und Heißrubbeln in Pkw-Scheibenbremsen**

Dem Fachbereich Maschinenbau

an der

Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte

## **Dissertation**

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Angelo Hilário Sardá**

aus Ituporanga - Brasilien

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann

Tag der Einreichung: 27.01.2009

Tag der mündlichen Prüfung: 14.04.2009





## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, dem Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik. Die stets hinterfragenden Diskussionen, die mir gewährten Freiheiten und die stetige Unterstützung durch ihn prägten meine Zeit am Fachgebiet und bereicherten mich fachlich und persönlich.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann danke ich für die Übernahme des Korreferats und für die wertvollen Gespräche und Hinweise zu meiner Forschungsarbeit.

Durch die faszinierenden Vorlesungen von Prof. em. Dr.-Ing. Bert Breuer, Gründer und ehemaliger Leiter von FZD, entschied ich mich während meines Studiums, meine Zukunft als Ingenieur der Fahrzeugtechnik zu widmen. Dafür sowie für die vielen Anregungen in den vergangenen Jahren bin ich ihm sehr dankbar.

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsprojekt erfolgte im Rahmen einer Kooperation mit der Firma Continental Teves. Für die intensive und hervorragende Zusammenarbeit mit allen beteiligten Mitarbeitern möchte ich mich herzlich bedanken. Insbesondere Dr.-Ing. Martin Semsch danke ich für die allumfassende Unterstützung.

Allen Mitarbeitern des Fachgebiets, einschließlich der Mitarbeiter der Werkstätten und des Sekretariats, danke ich herzlich für die äußerst angenehme und kollegiale Atmosphäre. Die Zeit bei FZD bereicherte mich um einige echte Freundschaften. Dr.-Ing. Norbert Fecher danke ich besonders für die Unterstützung in allen Phasen meiner Zeit am Fachgebiet.

Mein Dank gilt auch den zahlreichen Studierenden, die als Studien- und Diplomarbeiter bzw. als studentische Hilfskräfte maßgeblich zum Erfolg des Projekts beitrugen.

Meine Ehefrau Stefanie unterstützte mich stets mit ihrem Optimismus, sie übernahm besonders hohe Anteile der Lasten in anstrengenden Zeiten, schenkte mir unendliche Liebe. Sie hat wesentlich dazu beigetragen, dass mir auch die besonders anspruchsvolle Zeit der Erstellung der Dissertation Freude bereitet hat. Meine Dankbarkeit ihr gegenüber ist mit Worten nicht auszudrücken. Unsere gemeinsamen Töchter Emily und Paula, kamen während meiner Zeit bei FZD zur Welt und schenkten mir ebenfalls viel Kraft und Motivation.

## **Widmung**

Diese Arbeit widme ich meinem Vater, Hélio Hilário Sardá, der während der Bearbeitungszeit verstarb. Aufgewachsen in einem ländlichen Dorf im Süden Brasiliens musste er seine schulische Ausbildung nach der vierten Klasse abbrechen, um meinen Großeltern auf ihren Bauernhof auszuhelfen. Er wurde später Land- und Straßenvermesser und schließlich Unternehmer. Gemeinsam mit meiner Mutter, Marily, unterstützte er mich stets in meinem Bildungsweg. Nicht zuletzt ihm habe ich all meine Erfolge zu Verdanken.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung und der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Einfluss von Betriebsparametern	6
2.2	Einfluss von Bremskomponenteneigenschaften	7
2.2.1	Eigenschaften des Bremsbelags	7
2.2.1.1	Dicke des Bremsbelags	7
2.2.1.2	Belaglänge	9
2.2.2	Eigenschaften der Bremsscheibe	11
2.2.2.1	Bremsscheibenzusammensetzung	11
2.2.2.2	Bremsscheibengeometrie	12
2.3	Modellvorstellungen zur Hotspotentstehung	14
2.3.1	Thermoelastic Instabilities (TEI)	14
2.3.1.1	Übertragung auf die Hotspotentstehung in Bremsscheiben	17
2.3.1.2	Thermoelastodynamic Instabilities	20
2.3.1.3	Thermoelastic Instable Buckling	21
2.3.2	Mehrfeldtheorie	23
2.3.3	Progressive Waviness Distortion	26
2.4	Fazit zum Stand der Forschung	29
<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Methodik</b>	<b>30</b>
3.1	Zielsetzung der Arbeit	30
3.2	Methodik	31
<b>4</b>	<b>Hypothesenbildung</b>	<b>34</b>
4.1	Hypothesen zu Hotspotbildung bei aufeinanderfolgenden Bremsungen	34
4.2	Hypothesen zum Einfluss der Belagbogenlänge auf die Hotspotbildung	35
4.3	Hypothesen zum Initial-Hotspot	36
4.4	Hypothesen zu thermisch bedingten Bremsscheibendeformationen	37
<b>5</b>	<b>Untersuchungswerkzeuge und Versuchsdurchführung</b>	<b>38</b>
5.1	Schwungmassenprüfstand	38
5.2	Messtechnik	42
5.3	Untersuchtes Bremssystem	43
5.4	Durchgeführte Versuche	44
5.5	Versuchsauswertung	45
5.5.1	Hotspotdefinition	46

---

5.5.2	Drehzahl und Geschwindigkeit.....	47
5.6	Validation des Messverfahrens .....	48
5.6.1	Messung der Brems Scheibentopografie .....	48
5.6.2	Temperaturmessung .....	50
<b>6</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>54</b>
6.1	Erscheinungsbild von Hotspots .....	54
6.2	Reproduzierbarkeit .....	61
6.3	Folgebremungen.....	65
6.4	Einfluss der Bremsbelagbogenlänge.....	71
6.5	Entstehung von Temperaturschwankungen .....	76
6.6	Brems Scheibenverformung .....	78
6.6.1	Ergänzende Untersuchungen .....	84
6.6.2	Folgebremung.....	84
6.6.3	Bremungen mit Bremsbelägen höherer Kompressibilität .....	85
6.6.4	Geschwindigkeitsvariation bei konstanter Bremsleistung.....	87
6.7	Brems Scheibenverformung unter rein thermischer Belastung.....	88
6.7.1	Versuchsaufbau und Versuch .....	88
6.7.2	Versuchsergebnisse .....	90
<b>7</b>	<b>Überprüfung der Hypothesen .....</b>	<b>91</b>
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	94
<b>8</b>	<b>Kritik und Ausblick .....</b>	<b>96</b>
8.1	Zielerreichung und Gültigkeit .....	96
8.2	Übertragbarkeit der Ergebnisse .....	97
8.3	Relevanz für die Praxis.....	97
8.4	Offene Fragestellungen.....	99
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>100</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>101</b>

## Formelzeichen und Indizes

Lateinische Buchstaben:

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$a$	m	Scheibendicke
$A(T)$	°C	Amplitude der Temperatur
$A(x)$	µm	Amplitude der Verformung
$A$	./.	dimensionslose Scheibendicke
$b$	m	Breite
$D$	Nm	Biegesteifigkeit
$D_a$	M	Außendurchmesser
$D_i$	M	Innendurchmesser
$E$	N/mm <sup>2</sup>	E-Modul
$h$	M	Plattendicke
$k$	W/(K*m)	Wärmeleitfähigkeit (nach Lee)
$m$	./.	Welligkeitsordnung (nach Lee)
$M_T$	Nm	thermisch bedingtes Moment
$n$	./.	Welligkeitsordnung
$N_r$	N	radiale Membrankraft
$p$	bar	Druck
$p$	N/mm <sup>2</sup>	Flächenpressung
$s_{Belag}$	m	Belagdicke
$s_{Scheibe}$	m	Scheibendicke
$T$	°C	Temperatur
$t$	M	Tiefe
$\nu$	./.	Querkontraktionszahl
$V$	m/s	Gleitgeschwindigkeit
$V^*$	./.	kritische Gleitgeschwindigkeit
$w$	m	Auslenkung der Platte
$x$	µm	Abstand

## Griechische Buchstaben:

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$\alpha$	1/°C	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
$\lambda$	W/(K*m)	Wärmeleitfähigkeit
$\mu$	./.	Reibbeiwert
$\nabla$	./.	Nabla-Operator

## Abkürzungsverzeichnis

BPV	Brake Pressure Variation
BTV	Brake Torque Variation
DTV	Disk Thickness Variation
FEM	Finit-Element-Methode
FS	Faustseite
KS	Kolbenseite
PWD	Progressive Waviness Distortion
SPL	Sound Pressure Level
SRO	Surface RunOut
SUV	Sport Utility Vehicle
TEDI	Thermoelastodynamic Instability
TEI	Thermoelastic Instabilities
TGV	Train à Grande Vitesse



# 1 Einleitung

Die Kraftfahrzeugentwicklung ist in den vergangenen Jahrzehnten von kontinuierlichen Bestrebungen zur Erhöhung des Fahrkomforts geprägt. Maßnahmen in diesem Zusammenhang sind vielfältig und fachübergreifend: Zu den Verbesserungen bezüglich Ergonomie zählen beispielhaft Sitzkomfort und Bedienkomfort der Mensch-Maschine-Schnittstellen. Fahrerassistenzsysteme entlasten den Fahrer bei verschiedenen Aufgaben und tragen somit neben der Erhöhung der Fahrsicherheit auch zur Komfortverbesserung bei. Durch Optimierung der Aerodynamik und den Einsatz von Dämmmaterialien werden deutliche Absenkungen des Geräuschniveaus erreicht. Materialwahl und konstruktive Maßnahmen ermöglichen weitgehend die Vermeidung bzw. Unterdrückung von Vibrationen in der Karosserie und in der Fahrgastzelle.

Die Auslegung der Bremsanlage erfolgt unter der Maßgabe, das Fahrzeug zuverlässig und komfortabel zu bremsen und im Notfall eine Vollbremsung mit möglichst kurzem Bremsweg unter Beibehaltung der fahrdynamischen Stabilität zu gewährleisten.<sup>1</sup> Bei Scheibenbremsen, dem gegenwärtig in Personenkraftwagen am häufigsten eingesetzten Radbremsssystem, geschieht dies durch Umwandlung der kinetischen Energie in Reibungswärme. Die Bremsanlage erfüllt allerdings außerdem weitere Aufgaben, die vom Verhindern des Abrollens eines abgestellten Fahrzeugs bis hin zur fahrdynamischen Stabilisierung durch radselektive Eingriffe reichen. Aus dem Stellenwert der Bremsanlage für die Fahrsicherheit ergeben sich hohe Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit, Belastbarkeit und Lebensdauer. Aufgrund des ausgeprägten Wettbewerbs in der Fahrzeugindustrie spielen aber neben der Qualität auch die Entwicklungs- und Produktionskosten eine wichtige Rolle.

Die Bremse kann jedoch auch eine Quelle unterschiedlicher, komfortbeeinträchtigender Vibrationen darstellen. Diese werden gewöhnlich nach Frequenzband und Erregungsmechanismus klassifiziert, wie in der Abbildung 1.1 dargestellt.

Gemessen an dem Entwicklungsaufwand zu deren Vermeidung, stellen das Bremsenquietschen und das Bremsenrubbeln die in der Praxis am bedeutsamsten bremsinduzierten Vibrationen dar. Bei Bremsenquietschen handelt es sich um selbsterregte Schwingungen, die von Fahrzeuginsassen auditiv wahrgenommen werden und als störend empfunden werden.

---

<sup>1</sup> Breuer et al.: Bremsenhandbuch, 2006, S.18

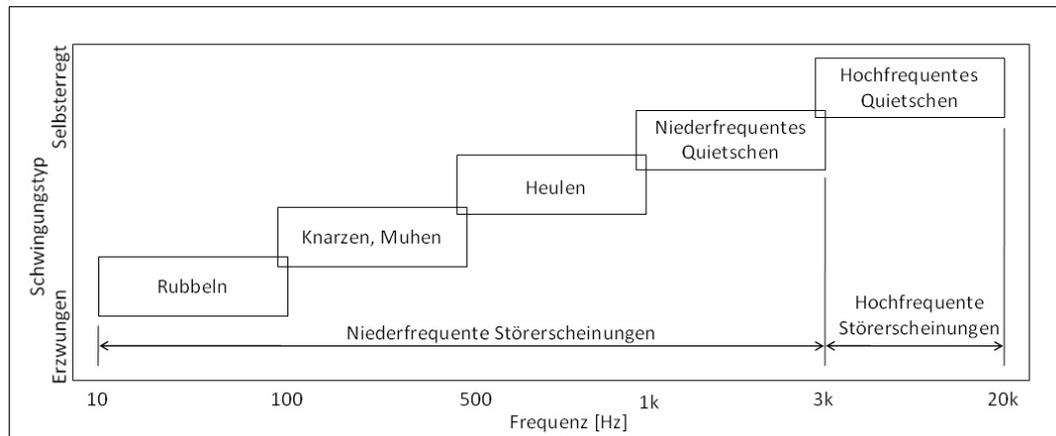


Abbildung 1.1: Einteilung der Schwingungen und Geräusche beim Bremsen<sup>2</sup>

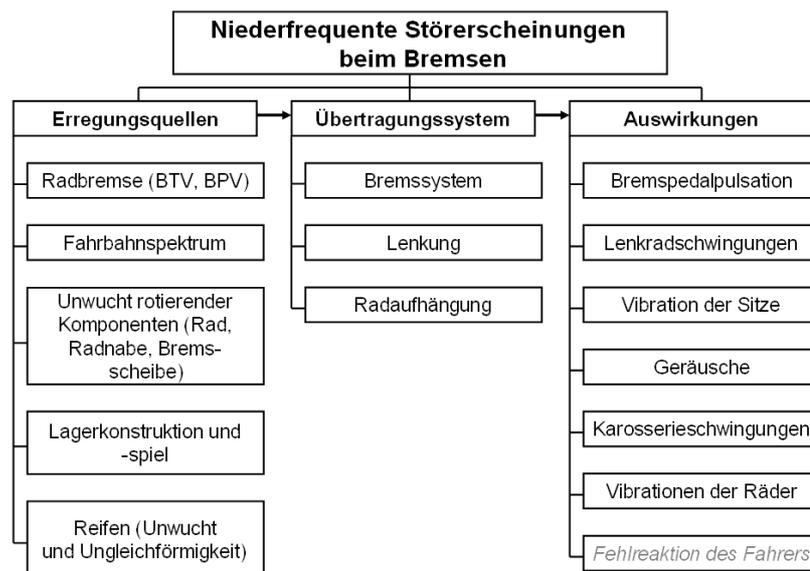


Abbildung 1.2: Niederfrequente Störerscheinungen beim Bremsen<sup>3</sup>

Bremsinduzierte niederfrequente Störerscheinungen weisen verschiedene Erregungsquellen, Übertragungswege und Auswirkungen auf, wie schematisch in der Abbildung 1.2 dargestellt.

Beim Bremsrubbeln handelt es sich um erzwungene, raddrehzahlabhängige, auf Brems-scheibendeformationen zurückzuführende Schwingungen. Wie bei allen Störerschei-

<sup>2</sup> Breuer et al.: Bremsenhandbuch, 2006, S.410

<sup>3</sup> Augsburg: Rubbelverhalten von Scheibenbremsen, 1999, S.22f

nungen, erfordern diese eine Quelle, ein Übertragungssystem und ein Wahrnehmungselement.<sup>4</sup> Die Wahrnehmung der Vibrationen durch die Fahrzeuginsassen ist sowohl von Anregung als auch von der Übertragung abhängig.<sup>5</sup>

Aufgrund der Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz von der Raddrehzahl ist üblicherweise dann von einer Rubbelfrequenz der  $n$ -ten Ordnung die Rede, wenn die Schwingungsfrequenz der  $n$ -ten harmonischen der Raddrehzahl entspricht. Es wird zwischen Kalt- und Heißrubbeln unterschieden. Kaltrubbeln ist auf permanente, d.h. auf „bereits im Kaltzustand“ vorhandene Bremsscheibendickenschwankungen (Disk Thickness Variation – DTV) zurückzuführen. Die Schwingungsordnung entspricht somit den geometrischen Unregelmäßigkeiten der Scheibentopografie.<sup>6</sup> Derartige geometrische Imperfektionen können sowohl durch Fertigungsungenauigkeiten entstehen als auch im Fahrbetrieb durch z.B. nur zeitweiligen Kontakt der Bremsbeläge mit einer aufgrund eines Scheibenschlages taumelnden Bremsscheibe, wie etwa bei einem nicht ausreichenden Luftspiel (Abstand der Beläge zur Bremsscheibe in unbetätigtem Zustand).

Durch Kaltrubbeln werden in der Regel Schwingungen der 1. und 2. Ordnung hervorgehoben.<sup>7</sup>

Heißrubbeln, das im Rahmen dieser Arbeit behandelte Phänomen, ist auf reversible Bremsscheibendickenschwankungen und –deformationen zurückzuführen, welche mit einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung auf den Reibflächen der Bremsscheibe gekoppelt sind.<sup>8</sup>

Bei Bremsungen mit niedriger bis mittlerer Verzögerung und hohen Anfangsgeschwindigkeiten bilden sich unter bestimmten Bedingungen mehrere Bereiche erhöhter Temperatur auf der Bremsscheibenoberfläche. Diese Hotspots (so genannte Hotspots) verteilen sich annähernd äquidistant und weisen häufig Temperaturunterschiede von über 200°C zu benachbarten Stellen in Umfangsrichtung der Bremsscheibe auf. Hotspots treten abwechselnd bzw. gegenläufig auf der Innen- und Außenfläche der Scheibe auf.<sup>9</sup> Der als üblich zitierte Bereich der Hotspotanzahl beträgt etwa sechs bis zwanzig.<sup>10</sup>

---

<sup>4</sup> Abdelhamid: Brake Judder: Case Studies, 1997, S.1225

<sup>5</sup> Engel, Bremserregte Lenkunruhe, 1998, S.105

<sup>6</sup> Abdelhamid: Brake Judder: Case Studies, 1997, S.1225f

<sup>7</sup> Schumann: Analysemethode zu Bremsscheibenverschleiß, 2006, S.4

<sup>8</sup> Fieldhouse: Investigation of Hot Judder, 2001, S.1

<sup>9</sup> Kubota: High-Speed Brake Judder, 1998, S.134

<sup>10</sup> Jacobsson: Disc Brake Judder, 2003, S.420f

Die mit der ungleichmäßigen Temperaturverteilung gekoppelte ungleichmäßige thermische Ausdehnung und Verformung der Bremsscheibe dient als Erregungsquelle für verschiedene Schwingungen, die vom Fahrer bzw. den Fahrzeuginsassen als Diskomfort wahrgenommen werden können.<sup>11</sup> Zum einen stellt eine unregelmäßige Topografie der Bremsscheibe eine Fußpunkterregung der Bremsbeläge dar und verursacht damit Bremsdruckschwankungen (Brake Pressure Variation – BPV). Dadurch wird die Bremsflüssigkeitssäule mit der Frequenz der Anregung in Schwingung gesetzt. Bei gegebener mechanischer Kopplung der Betätigungselemente (Hauptzylinder, Bremskraftverstärker) kann diese Vibration bis zum Bremspedal übertragen werden und wird an dieser Schnittstelle vom Fahrer als Pulsation wahrgenommen. Zum anderen entstehen Bremsmomentschwankungen (Brake Torque Variation - BTV), die an den Kontaktflächen zwischen Reifen und Fahrbahn zu Bremskraftschwankungen führen. Die Kraft- und Momentschwankungen regen das Fahrwerk und das Lenksystem an und führen somit zu Lenkraddreherschwingungen sowie Schwingungen an der Fahrzeugkarosserie. Je nach Schwingungsfrequenz sind die auf diese Weise verursachten Vibrationen haptisch und/oder akustisch als Dröhngeräusch wahrnehmbar.<sup>12</sup>

Zudem wird eine mögliche Gefahr von Fehlreaktionen des Fahrers aufgrund der Störerscheinungen oftmals erwähnt, da wenn ein Brems- oder Fahrzeugdefekt vermutet wird, das Lösen des Bremspedals eine mögliche Reaktion sein kann und somit kritische Situationen hervorrufen werden können.<sup>13</sup> Objektive Daten, die eine solche Vermutung belegen könnten, liegen jedoch nicht vor.

Beim Auftreten lokaler Hitzeflecken ist außerdem beobachtet worden, dass der Scheibenwerkstoff in einer 0,1 bis 0,5 mm dicken Schicht die Gefügeumwandlungstemperatur (820 – 860 °C) kurzzeitig überschreitet, wodurch sich Austenitinseln bilden. Bei nachfolgender schneller Abkühlung kann die Rückbildung von Perlit unterdrückt werden und es entstehen Bainit- oder gar Martensitinseln.<sup>14</sup> Aufgrund der unterschiedlichen Kristallstrukturen, spezifischen Volumina und Härten können dadurch Randschichtspannungen entstehen, die zu Rissbildung führen. Zudem kann der Verschleiß inhomogen werden, so dass bleibende Geometrieabweichungen herausgebildet werden, die

---

<sup>11</sup> Haigh et al.: Vehicle Judder Under Dynamic Braking, 1993, S.247

<sup>12</sup> Stringham et al.: Brake Roughness

<sup>13</sup> Bittner: Reduzierung des Rubbelns durch Optimierung der Fahrwerkslagerung, 2006, S.3

<sup>14</sup> Keiner: Hochgekohlter Grauguß als Werkstoff für Bremsscheiben, 1990, S.10

---

wiederum eine weitere Anregungsquelle für bremsinduzierte Vibrationen darstellen können.<sup>15</sup>

Wie eingangs erwähnt nimmt der Fahrkomfort bei modernen und qualitativ hochwertigen Fahrzeugen einen hohen Stellenwert an, so dass ein Auftreten der oben beschriebenen bremsinduzierten Vibrationen nach heutigen Qualitätsstandards nicht toleriert wird. Zur Vermeidung von Heißrubbeln werden deshalb während des Entwicklungsprozesses umfassende Testprozeduren nach definierten Spezifikationen durchgeführt, die erheblich monetäre Ressourcen und (Entwicklungs-)Zeit beanspruchen. Maßnahmen zur Verbesserung des Systemverhaltens hinsichtlich der Neigung zu Heißrubbeln sind konstruktive Anpassungen sowie der Austausch einzelner oder mehrerer Komponenten der Bremse. Konstruktive Veränderungen können zeitaufwändig sein, da neben der Notwendigkeit des Prototypbaus die gesamte Erprobung erforderlich sein kann. Der Austausch von Komponenten birgt die Gefahr, andere Eigenschaften des Systems (sowohl bezüglich des Komforts als auch der Leistungsfähigkeit) negativ zu beeinflussen. Gelingt die Vermeidung des Auftretens von Heißrubbeln und den damit verbundenen Vibrationen beim Serienprodukt nicht, sind Kundenreklamationen eine mögliche Folge, so dass die

damit verbundene Wartungs- und Reparaturarbeiten im Rahmen von Garantieleistungen, Austausch von Komponenten und Imageverluste zu erheblichen Schäden führen können.<sup>16</sup>

Seit über vier Jahrzehnten steht das Phänomen der Hotspotbildung im Mittelpunkt zahlreicher Studien. Trotz der erreichten Fortschritte, insbesondere hinsichtlich der Ermittlung von Einflussparametern, fehlen belastbare Aussagen zur Ursache der Hotspotbildung.

## **2 Stand der Forschung und der Technik**

Dieses Kapitel liefert eine Zusammenfassung der Erkenntnisse bekannter Untersuchungen zur Entstehung und Ausprägung von Hotspots und Heißrubbeln sowie zu deren Einflussparametern. Es wird zunächst auf experimentell ermittelte Einflüsse von Be-

---

<sup>15</sup> Kao: Disc hot spotting and thermal judder, 2000, S.277f

<sup>16</sup> Breuer et al.: Bremsenhandbuch, 2006, S.410

triebsparametern sowie von Eigenschaften der Bremskomponenten eingegangen. Anschließend werden bekannte Modellvorstellungen zu den Ursachen für die Hotspotentstehung vorgestellt.

## 2.1 Einfluss von Betriebsparametern

Es wird durch zahlreiche Untersuchungen belegt, dass die Hotspotscheinungen bei geringen Abbremsungen aus höheren Geschwindigkeiten am intensivsten sind. Augsburg<sup>17</sup> nennt in diesem Zusammenhang beispielsweise Abbremsungen von 10% bis 30%. Grochowicz<sup>18</sup> nennt Abbremsungen zwischen 13% und 23%. Bei Fahrversuchen von Kubota<sup>19</sup> wurde die Hotspotbildung bei Bremsungen mit Anfangsgeschwindigkeiten ab 180 km/h und Abbremsungen von ca. 30% beobachtet. Messreihen mit Bremsdrücken von 15 bar bis 45 bar von Steffen<sup>20</sup> ergaben, dass bei einer Erhöhung des Bremsdrucks die Intensität der Hotspots abnimmt. Außerdem wurde dabei beobachtet, dass Hotspots bei verschiedenen Anfangstemperaturen auftraten, wobei geringere Anfangstemperaturen die Intensität der Hotspots erhöhen. Einen Einfluss der Anfangstemperatur auf die Anzahl der Hotspots wird aber nicht nachgewiesen.

Kubota<sup>21</sup> stellte anhand von Fahrversuchen die Übereinstimmung zwischen dem gemessenen Dröhngeräusch im Innenraum des Fahrzeugs, Bremsmomentschwankungen, Bremsscheibentopografiewelligkeit und Scheibendickenschwankungen fest, wie in der Abbildung 2.1 dargestellt.

---

<sup>17</sup> Augsburg: Rubbelverhalten von Scheibenbremsen, 1999, S.22

<sup>18</sup> Grochowicz: Bremsdruck- und Bremsmomentschwankungen, 1995, S.59

<sup>19</sup> Kubota et al.: High-Speed Brake Judder, 1998, S.133

<sup>20</sup> Steffen: Hotspotbildung, 1998, S.25

<sup>21</sup> Kubota et al.: High-Speed Brake Judder, 1998, S.135

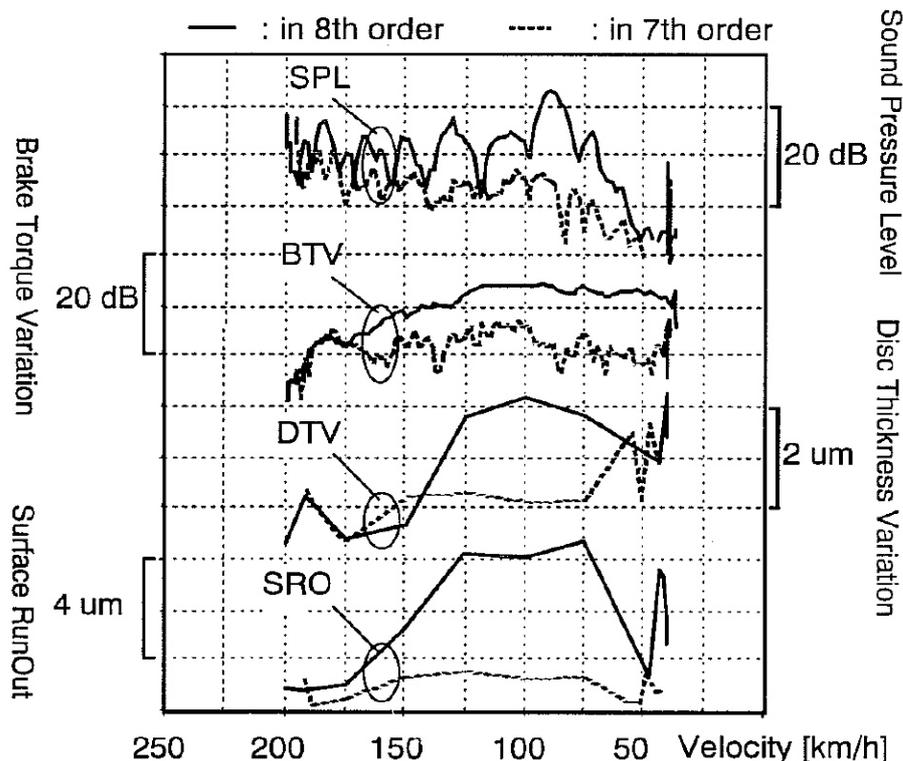


Abbildung 2.1: Amplituden von Geräuschpegel, BTV, DTV und Topografie welligkeit der 7. und 8. Ordnungen

## 2.2 Einfluss von Bremskomponenteneigenschaften

In diesem Abschnitt werden experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Einflüsse von Eigenschaften der Bremskomponenten Bremsbelag und Bremsscheibe auf das Heißrubbilverhalten vorgestellt. Alle im Folgenden dargestellten Ergebnisse entstanden beim Einsatz von Schwimmsattel. Vergleiche zwischen verschiedenen Bremsattelkonzepten sind in der gesichteten Literatur nicht vorhanden.

### 2.2.1 Eigenschaften des Bremsbelags

#### 2.2.1.1 Dicke des Bremsbelags

Der Einfluss der Dicke des Bremsbelags (die unmittelbar die Bremsbelagkompressibilität beeinflusst) wurde anhand mehrerer Untersuchungen experimentell analysiert. Der Begriff „Kompressibilität“ wird in der Bremsenentwicklung als Verhältnis zwischen einer auf dem Belagmaterial wirkende Normalkraft zu der daraus resultierenden Verformung in Wirkrichtung dieser Kraft.

Bei Prüfstandsversuchen von Little<sup>22</sup> zur Untersuchung von Heißrubbeln erfolgte eine Variation der Belagdicke. Erkannt wurde, dass bei Verwendung von Belägen reduzierter Dicke eine Zunahme der Temperatur- und Bremsmomentschwankungen für alle Startgeschwindigkeiten stattfand. Während sich beim Bremsbelag mit der originalen Anfangsdicke über den Verlauf der Bremsung nur die Bremsscheibendickenschwankungen vergrößerten, traten in Umfangsrichtung der Bremsscheibe für alle Anfangsgeschwindigkeiten bei den dünneren Belägen elf Hotspots auf beiden Scheibenseiten in alternierender Anordnung auf. Zusammenhänge zwischen Hotspotbildung und damit gekoppelten Bremsscheibendeformationen wurden jedoch nicht behandelt.

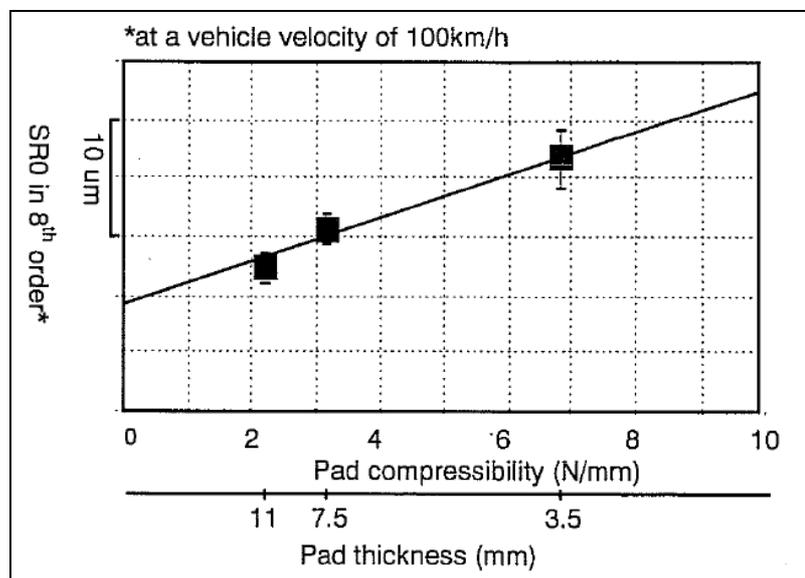


Abbildung 2.2: Einfluss der Belagdicke auf die Ausprägung der Bremsscheibenwelligkeit<sup>23</sup>

Bei Fahrversuchen von Kubota<sup>23</sup> wurde der Einfluss der Belagkompressibilität durch Reduzierung der Belagdicke auf die Hotspotbildung untersucht. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Aufgetragen ist die Amplitudenhöhe der 8. Ordnung des Wegsignals über der Belagdicke bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h. Die Reduzierung der Belagdicke führte zur Zunahme der Amplitude der gemessenen Welligkeit der Bremsscheibentopografie. Demnach wurde das Fazit gezogen, dass die Hotspotausprägung mit abnehmender Belagdicke zunimmt.

<sup>22</sup> Little et al.: Material properties on sliding contact, 1998, S.83

<sup>23</sup> Kubota et al.: High-Speed Brake Judder, 1998, S.136

Bei experimentellen Untersuchungen von Steffen<sup>24</sup> in einem Schwungmassenprüfstand wurde zur Bestimmung des Einflusses auf die Hotspotbildung die Bremsbelagdicke zwischen 4 und 12 mm variiert. Hotspots bildeten sich nur bei Belagdicken unterhalb von 8 mm, wobei kein Zusammenhang zwischen Belagdicke und Hotspotanzahl festgestellt wurde.

### 2.2.1.2 Belaglänge

Bei experimentellen Untersuchungen von Kubota<sup>25</sup> wurde im Fahrversuch das Verformungsverhalten der Bremsscheibe unter Verwendung von Belägen verschiedener Bogenlängen betrachtet. Dazu wurde aus dem Originalbelag am Anfang und Ende Reibmaterial entfernt. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

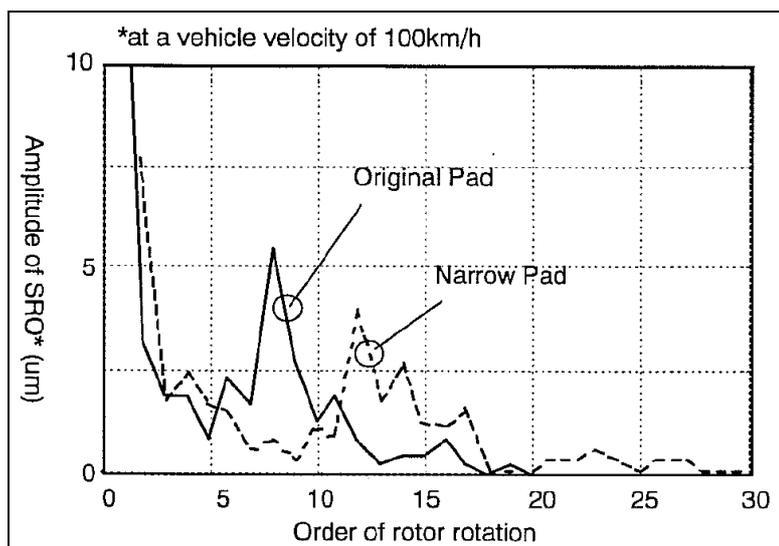


Abbildung 2.3: Einfluss der Belaglänge auf die Hotspotanzahl.<sup>25</sup>

Aufgetragen ist das Amplitudenspektrum des Wegsignals bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h, wobei keine Angaben zu den jeweiligen Anfangsbedingungen sowie zur Bremsleistung vorhanden sind bzw. ob diese bei den Versuchen konstant gehalten wurden. Erkannt wurde, dass sich durch die Verwendung von kürzeren Belägen die dominante Ordnung erhöhte und die Amplitude verringerte. Zu beachten sind jedoch die

<sup>24</sup> Steffen: Hot Spot simulation, 2006, S.13

<sup>25</sup> Kubota et al.: High-Speed Brake Judder, 1998, S.136

absoluten Werte und relativen Unterschiede der Welligkeiten, die jeweils wenige Mikrometer betragen (zum Einsatz kamen bei dieser Untersuchung Abstandssensoren mit einer Auflösung von  $2,5\ \mu\text{m}$ ). Durch die Veränderung der Ordnung wurde schlussfolgert, dass sich die Hotspotanzahl verändert hat. Direkte Angaben zur Temperaturverteilung sind jedoch nicht vorhanden.

Bei experimentellen Untersuchungen zur Hotspotentstehung von Panier<sup>26</sup> an einer Eisenbahnbremse wurde das Hotspotbildungsverhalten mit Originalbelägen sowie mit Belägen verkürzter Bogenlänge beobachtet. Ein weiterer Variationsparameter stellt die Anfangsgeschwindigkeit (60, 90, 120 und 200 km/h) dar. Die Originalbeläge besaßen dabei ein Bogenmaß von  $66^\circ$ , die bearbeiteten Beläge ein Bogenmaß von  $44^\circ$  und waren somit um  $1/3$  in der Bogenlänge reduziert. Während bei der Bremsung zwischen 60 km/h und 90 km/h und einer Dissipationsenergie zwischen 1,4 MJ und 9,4 MJ lediglich Hotbanding (ringförmige Bereiche erhöhter Temperatur über den Bremsscheibenumfang) entstand, traten oberhalb 90 km/h Hotspots auf. Nach der Interpretation der Autoren der Studie werden beim Einsatz von Belägen der Originallänge 6 Hotspots auf der Scheibe erkannt, mit verkürztem Belag dagegen 9 Hotspots. Die Auswertung erfolgte durch visuelle Betrachtung der Thermobildaufnahmen, die in der Abbildung 2.4 dargestellt sind.

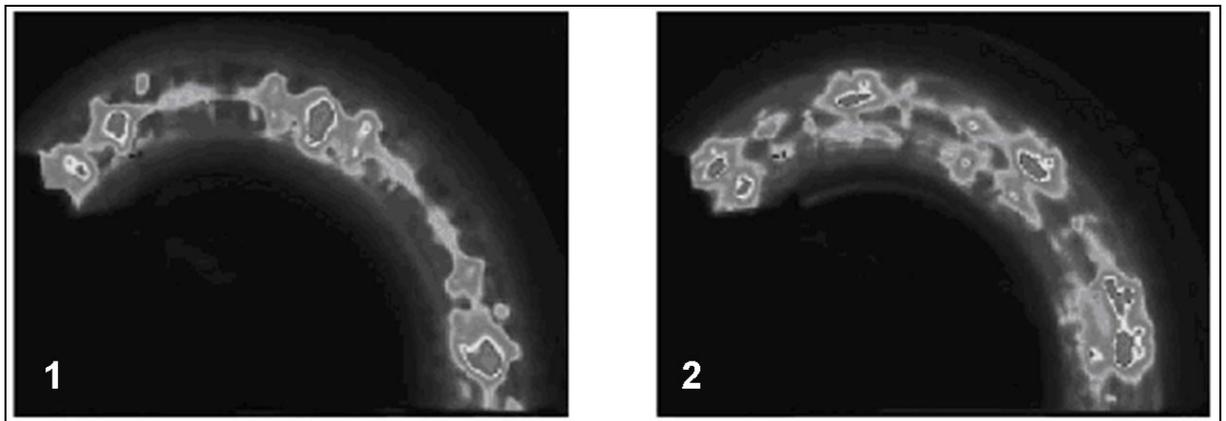


Abbildung 2.4: Hotspots beim Originalbelag (1) und beim kürzeren Belag (2).<sup>26</sup>

Daraus wurde schlussfolgert, dass eine Belagverkürzung der Bogenlänge um  $1/3$  zur Bildung von 50% mehr Hotspots führe.

---

<sup>26</sup> Panier: Investigation of hot spots, 2004, S.765 ff.

## 2.2.2 Eigenschaften der Bremsscheibe

### 2.2.2.1 Bremsscheibenzusammensetzung

Nach Keiner<sup>27</sup> und Lampic<sup>28</sup> wird eine Abhängigkeit des Rubbelverhaltens von der Zusammensetzung der Bremsscheiben und vor allem der Verankerung des Graphits im Werkstoff vorhergesagt.

Ein Vergleich zweier Scheiben gleicher Bauart von verschiedenen Herstellern lieferte nach Steffens<sup>29</sup> Untersuchungen grundlegend unterschiedliches Verhalten bezüglich Hotspotbildung. Durch spektrometrische Untersuchungen zur Bestimmung der Zusammensetzung des Bremsscheibenmaterials, Härtemessungen und Analyse der Schlifffbilder konnten keine Ursachen für die unterschiedlichen Auswirkungen gefunden werden. Der Einfluss von während des Scheibenherstellungsprozesses entstehender Eigenspannung wird als Ursache vermutet, jedoch wird kein Beleg für die Annahme geliefert.

Der Einfluss unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten des Bremsscheibenwerkstoffs auf die Temperaturverteilung in der Bremsscheibe wurde experimentell von Kubota<sup>30</sup> untersucht. Verwendet wurden zwei geometrisch gleiche Bremsscheiben aus verschiedenen Werkstoffen mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten. Das Ergebnis der experimentellen Versuche ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Die Amplituden der Temperaturschwankungen in den jeweils dominanten Ordnungen betragen etwas unter 40 °C für die Scheibe mit dem Material niedrigerer Wärmeleitfähigkeit bzw. etwas weniger als 20 °C für die Scheibe mit dem Material höherer Wärmeleitfähigkeit. Die Testbedingungen werden jedoch nicht genannt und es erfolgt keine Diskussion über Einflüsse von möglichen Abweichungen der weiteren physikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien.

---

<sup>27</sup> Keiner: Hochgekohter Grauguss als Werkstoff für Bremsscheiben, 1990, S.7f

<sup>28</sup> Lampic: Bremsrubbeln aus Sicht des Bremsscheibenherstellers, 1995, S.65f

<sup>29</sup> Steffen: Hotspotbildung, 1998, S.19

<sup>30</sup> Kubota: High speed brake judder, 1998, S.137

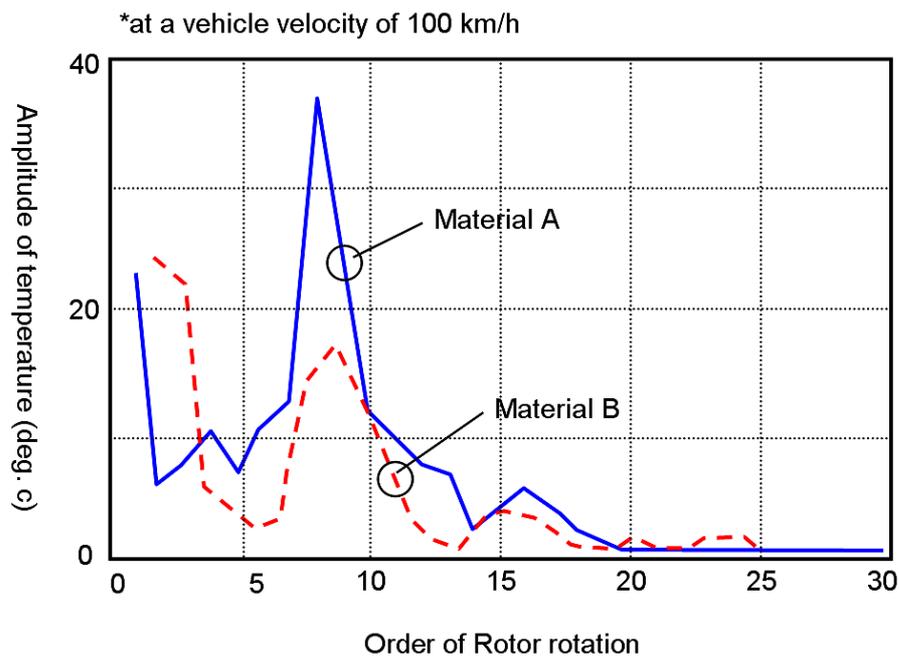


Abbildung 2.5: Der Effekt der Wärmeleitfähigkeit auf die Hotspots ( $\lambda_A < \lambda_B$ )<sup>31</sup>

### 2.2.2.2 Bremsscheibengeometrie

Bei den Versuchsreihen von Steffen<sup>32</sup> wurde der Einfluss der Bremsscheibendicke auf die Hotspotentstehung untersucht. Es erfolgte eine Variation von Scheiben- bzw. Belagdicken von  $s_{Scheibe,1...4} = 9, 10...12$  mm und  $s_{Belag,1...3} = 6, 8, 10$  mm. Die mittlere Brems-scheibenanfangstemperatur wurde zwischen  $T_{1...4} = 50, 100...200$  °C variiert.

Bei den Versuchen kam es bei massiven Bremsscheiben mit Belagdicken kleiner als 8 mm oder Scheibendicken kleiner als 10 mm zur Hotspotbildung. Bei weiterer Verringerung der Belag- bzw. Scheibendicke intensivierte sich die Hotspotausprägung. Die Hotspotanzahl blieb konstant bei zehn bis auf eine Ausnahme, bei der sich elf Hotspots bildeten. Die Auswertung der Temperaturverteilung erfolgte durch Betrachtung der Aufnahmen einer Thermobildkamera.

Im Rahmen der gleichen Studie<sup>33</sup> wurde der Einfluss der Reibringgeometrie auf die Anzahl der Hotspots untersucht. Die zu untersuchenden Bremsscheiben haben einen Außendurchmesser von  $D_{a,1...5} = 240, 260...320$  mm, einen Innendurchmesser von

<sup>31</sup> Kubota: High speed brake judder, 1998, S.137

<sup>32</sup> Steffen: Hotspotbildung, 1998, S.12f

<sup>33</sup> Steffen: Hotspotbildung, 1998, S.16f

$D_i=65$  mm und eine Dicke von  $s_{Scheibe}=10$  mm. Die variable Bremsbelagdicke und mittlere Anfangstemperatur werden konstant gehalten ( $s_{Belag}=10$  mm und  $T=150$  °C). Bei einer Vergrößerung des Reibrings ( $D_{a,l}=240$  mm auf  $D_{a,s}=320$  mm) erhöhte sich die Hotspotanzahl von 11 auf 13 (Abbildung 2.6).

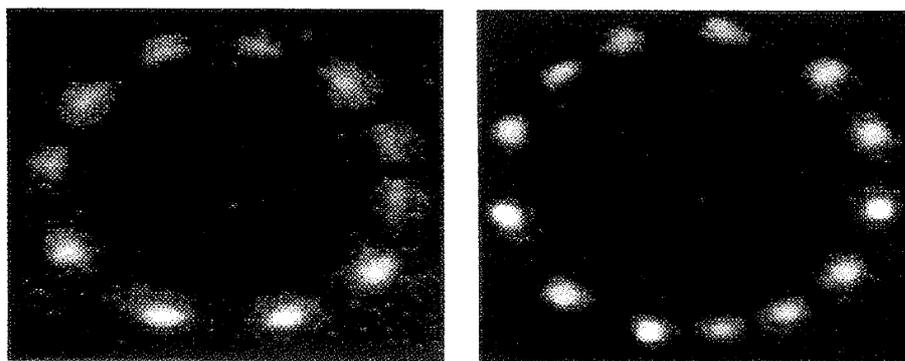


Abbildung 2.6: Wärmebildaufnahme mit 11 Hotspots der Scheibe mit  $D_a=240$  mm (links) und mit 13 Hotspots der Scheibe mit  $D_a=320$  mm (rechts)<sup>33</sup>

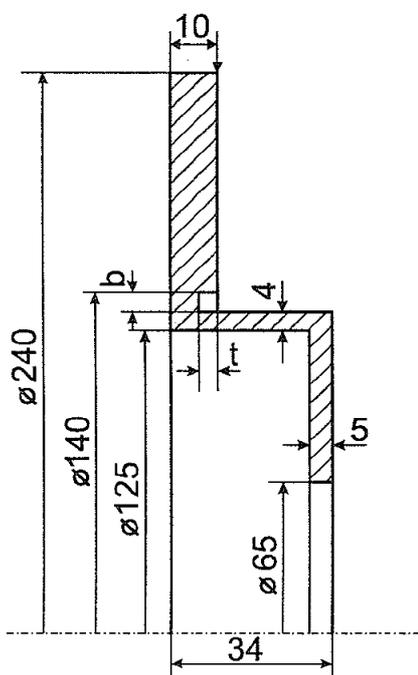


Abbildung 2.7: Geometrische Abmessung der Scheibe inklusive des Einstichs, der durch die Abmessungen  $b$  und  $t$  beschrieben wird

Der Einfluss der Einstichgeometrie (s. Abbildung 2.7) zwischen Reibring und Brems-scheibentopf auf die Hotspotbildung und auf die Schirmung der Scheibe wurde für die Einstichparameter Breite und Tiefe ( $b=t= 5...7$  mm) untersucht<sup>34</sup>. Während die Brems-scheibenschirmung maßgeblich beeinflusst wurde (s. Abbildung 2.8), konnte kein rele-vanter Einfluss auf die Hotspotbildung festgestellt werden.

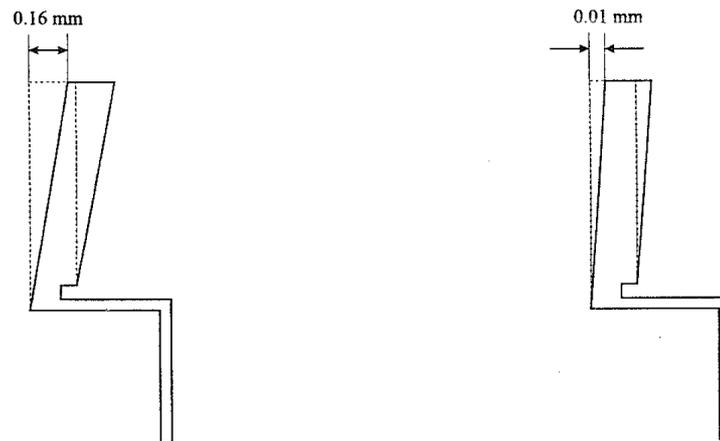


Abbildung 2.8: „Tellern“ der Scheibe mit OriginalEinstichgeometrie 5 mm x 5 mm (links) und mit Ein-stichgeometrie 6 mm x 6 mm (rechts)<sup>34</sup>

## 2.3 Modellvorstellungen zur Hotspotentstehung

### 2.3.1 Thermoelastic Instabilities (TEI)

Die als „Thermoelastic Instabilities“ (TEI) bekannte Modellvorstellung zur Beschrei-bung der Entstehung von Hotspots wurde erstmals im Jahre 1969 von Barber<sup>35</sup> be-schrieben. Die Grundannahme der TEI besteht darin, dass die Reibpartner im realen Reibungsvorgang nicht ideal eben, sondern an vielen einzelnen Kontaktstellen aneinan-der lägen. Die Flächenpressung verteile sich daher nicht gleichmäßig über die Oberflä-che, sondern konzentriere sich auf diese Kontaktbereiche, deren Anzahl beispielsweise von der Oberflächenrauigkeit abhängen kann. An diesen Stellen werde die Reibungs-energie in Wärme umgesetzt. Stelle man sich nun einen einzelnen dieser Kontaktpunkte

---

<sup>34</sup> Steffen: Hotspotbildung, 1998, S.22f

<sup>35</sup> Barber, J. R.: Thermoelastic Instabilities in the Sliding of Conforming Solids, 1969

vor, so bilde sich durch die Wärmeleitung von dem Punkt in die Umgebung ein entsprechender Temperaturgradient aus. Der Punkt werde darauf hin in höherem Maße senkrecht zur Oberfläche wachsen als die Umgebung. Gleichzeitig würde aber auch der Verschleiß des Punktes zunehmen, bis er sich wieder der Oberfläche angleicht. Ein weiterer Punkt, in der Nähe des ersten, gelange somit auch wieder in Kontakt mit dem Reibpartner, so dass der erste Punkt weiter entlastet werde, bis der zweite Punkt schließlich vollständig den Anteil der Last des ersten Punktes übernommen habe. Der erste Punkt ziehe sich dadurch bis unterhalb des Umgebungsniveaus zusammen um einen Betrag, der dem vorangegangenen Verschleiß entspreche<sup>36</sup>. Derselbe Vorgang wiederhole sich nun für den zweiten Punkt, so dass die Lastverteilung zwischen den Punkten zyklisch wandere. Zur Überprüfung dieses Sachverhalts wurde anhand des in der Abbildung 2.9 dargestellten Versuchsaufbaus der zeitliche Temperaturverlauf in der Nähe der Oberfläche eines Graugussblocks mit einem Thermoelement für verschiedene Gleitgeschwindigkeiten aufgezeichnet. Abweichend zum Reibvorgang in einer Scheibenbremse, fand der Kontakt zwischen Rotor und Graugussblock an der Stirnoberfläche des Rotors statt.

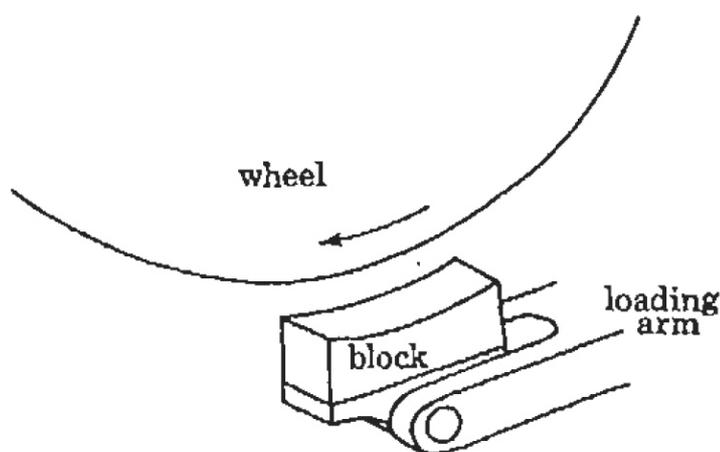


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus<sup>37</sup>

Die in der Abbildung 2.10 dargestellten, kurzzeitig zu beobachtenden Spitzentemperaturen werden als Hotspots bezeichnet<sup>38</sup>. Nach dieser Theorie entspricht die Dauer ihres

<sup>36</sup> Barber, J. R.: The Influence of Thermal Expansion on the Friction and Wear Process, 1967, S.157

<sup>37</sup> Barber, J. R.: Thermoelastic Instabilities in the Sliding of Conforming Solids, 1969, S.382

<sup>38</sup> Barber, J. R.: The Influence of Thermal Expansion on the Friction and Wear Process, 1967, S.155

Auftretens der Zyklendauer des beschriebenen Vorgangs an dem Punkt der Temperaturmessung.

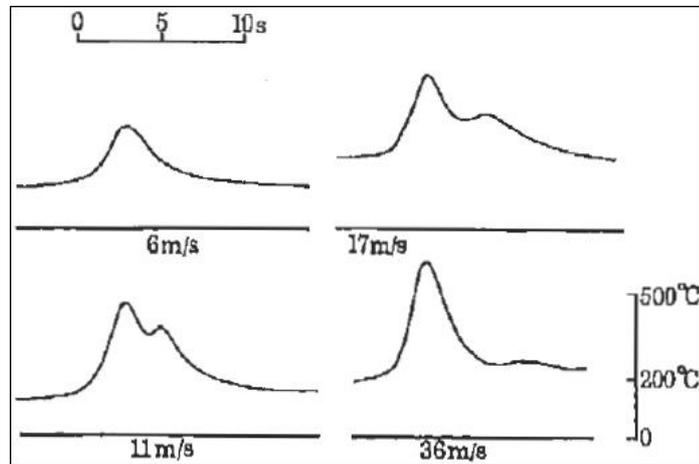


Abbildung 2.10: Temperaturschwankungen für verschiedene Gleitgeschwindigkeiten<sup>39</sup>

Die Stabilität des Prozesses hänge von dem Verhältnis der Rate der thermischen Ausdehnung zur Rate des Verschleißes ab. Da eine ungleichmäßige Flächenpressungsverteilung zu einem ungleichmäßigen Wachstum der Oberfläche führe et vice versa, sei dieser Vorgang selbstverstärkend. Ein Abklingen könne nur durch den der Ausdehnung entgegenwirkenden Verschleiß erfolgen, wenn dieser größer sei als die Rate der Ausdehnung. Sei dies nicht der Fall, so werde jede anfängliche Unregelmäßigkeit in der Flächenpressungsverteilung verstärkt, worauf sich diese in relativ kleinen Bereichen konzentrieren könne und der Prozess instabil werde<sup>40</sup>. Dieses Zusammenwirken von elastischer, thermischer Verformung und Verschleiß führt demnach auf die Bezeichnung „Thermoelastic Instability“. In der Praxis sei die Dauer dieser Instabilität begrenzt und es stelle sich ein neuer stabiler Zustand ein, da die Wärmedehnung und der Verschleiß temperaturabhängig seien. Die Geschwindigkeit der Wärmedehnung nehme somit im Laufe des Zyklus ab, während der Verschleiß mit der Temperatur zunehme, bis sich diese wieder im Gleichgewicht befänden.

<sup>39</sup> Barber, J. R.: Thermoelastic Instabilities in the Sliding of Conforming Solids, 1969, S.383

<sup>40</sup> Barber, J. R.: Thermoelastic Instabilities in the Sliding of Conforming Solids, 1969, S.385

### 2.3.1.1 Übertragung auf die Hotspotstehung in Bremsscheiben

Bezieht man die TEI-Theorie von Barber auf den Bremsvorgang, so bedeute dies, dass auch hier keine völlig gleichmäßige Flächenpressungsverteilung zwischen Reibring und Bremsbelag vorliege. Kommt es zu einer Unregelmäßigkeit bzw. Störung im Kontaktbereich, so werde die thermomechanische Wechselwirkung zwischen reibungsinduzierter Wärmedehnung und Verschleiß ab einer bestimmten Gleitgeschwindigkeit der Reibpartner, auch kritische Geschwindigkeit genannt, instabil. Diese kritische Geschwindigkeit sei unter anderem abhängig von der Temperaturleitfähigkeit  $k_2$  der Bremsscheibe, deren Dicke  $a$  sowie der dominanten Ordnung  $m$  der Störung. In Gl. (2.1) ist die kritische Geschwindigkeit als dimensionslose Kennzahl

$$V^* = \frac{V}{k_2 m} \quad (2.1)$$

in Abhängigkeit des Produkts  $A = m \cdot a$  von Welligkeitsordnung und Scheibendicke für eine sinusförmige Störung aufgetragen. Die mathematische Betrachtung des Auftretens von TEI durch Lee und Barber führt zu einem Eigenwertproblem, welches symmetrische und schiefsymmetrische Eigenformen für die resultierende Scheibenverformung zulässt, wie in Abbildung 2.11 dargestellt. Da sich für die schiefsymmetrischen Eigenformen niedrigere zur Instabilität führende Geschwindigkeitswerte ergeben, träten diese in der Praxis auf. Der schiefsymmetrische Fall sei verknüpft mit der Bildung von sich in ihrer Position alternierenden Hotspots auf beiden Bremsscheibenseiten, und führe dadurch zu einer Verbeulung der Bremsscheibe.<sup>41</sup>

---

<sup>41</sup> Lee: Frictionally Excited Thermoelastic Instabilities in Disk Brakes, 1993, S.612

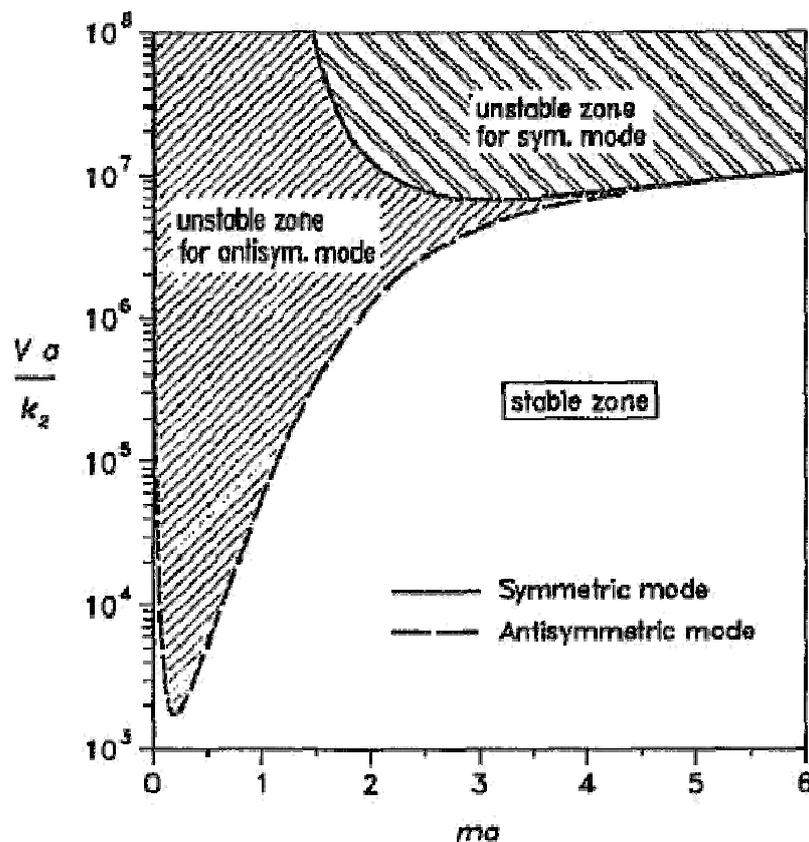


Abbildung 2.11: Kritische Geschwindigkeit für die symmetrischen und antisymmetrischen Deformationen<sup>42</sup>

Grundsätzlich sei das Modell ausschließlich für Bremsbeläge unendlicher Länge gültig. Jedoch wird die Annahme getroffen, dass die Modellvorstellung und somit die Vorhersagen zur Instabilität eine gute Näherung darstellen könnten, wenn die Belagbogenlänge mindestens der Wellenlänge der Störung bzw. der Temperaturschwankungen entspreche, d.h. es befinde sich immer mindestens ein Hotspot in der Kontaktfläche zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe. Da das Modell die Mechanismen der Hotspotentstehung beschreiben soll wird daraus schlussgefolgert, dass der Abstand zwischen einzelnen Hotspots niemals größer als die Länge des Bremsbelags in Umfangsrichtung sei.<sup>43</sup>

Bei der mathematischen Behandlung des TEI-Problems wurde die anfängliche Störung der Flächenpressungsverteilung als sinusförmig angenommen, ohne näher auf ihre Herkunft einzugehen. Bei Versuchen von Lee und Dinwiddie<sup>44</sup> wurde dazu der Einfluss

<sup>42</sup> Lee: Frictionally Excited Thermoelastic Instabilities in Disk Brakes, 1993, S.611

<sup>43</sup> Lee: Frictionally Excited Thermoelastic Instabilities in Disk Brakes, 1993, S.612

<sup>44</sup> Lee: Conditions of Frictional Contact in Disk Brakes, 1998, S.169-173

von Scheibenschlag und damit verbundenen DTV als mögliche Ursache der Störungen im Temperaturfeld auf die Neigung zur Hotspotbildung in Scheibenbremsen untersucht. Bei Schlepptbremsungen mit einer Geschwindigkeit von 95 km/h wurde lediglich Hotbanding festgestellt, während bei Erhöhung der Geschwindigkeit auf 128 km/h die Bildung von Hotspots beobachtet wurde. Da der beobachtete Abstand zwischen den einzelnen Hotspots kleiner als die Länge des Bremsbelags in Umfangsrichtung war, wurde die oben genannte Bedingung (stets mindestens ein Hotspot in der Kontaktfläche zwischen Belag und Scheibe) erfüllt.

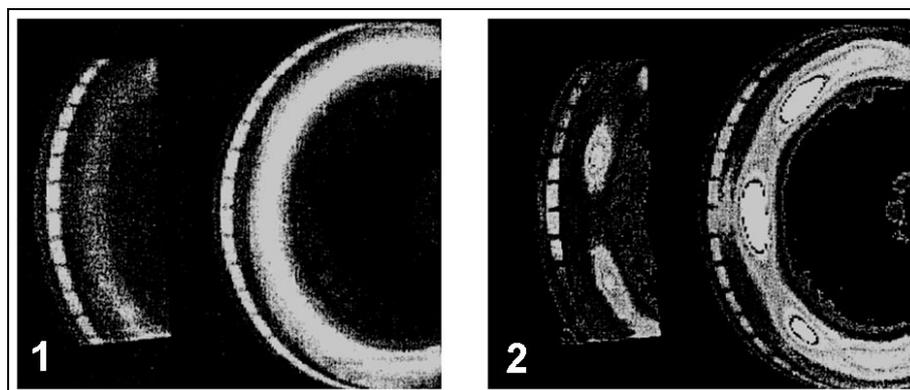


Abbildung 2.12: Hotbanding (1) bei Schlepptbremsungen mit 95 km/h und Hotspots bei Schlepptbremsung mit 128 km/h<sup>45</sup>

Auch bei den Untersuchungen von Yi et al.<sup>46</sup> wurde oben genannte Bedingung erfüllt. Anzumerken ist jedoch, dass die Hotspotbildung bei der Schlepptbremsung erst nach ca. 60 Sekunden startete, wie in der Abbildung 2.13 dargestellt. Zudem blieb die Amplitude der Temperaturschwankungen im weiteren Verlauf des Bremsvorgangs relativ gering, so dass die Relevanz der beobachteten Erscheinung sowie die Übertragbarkeit auf Heißrubbeln in der Praxis fraglich sind.

---

<sup>45</sup> Lee: Conditions of Frictional Contact in Disk Brakes, 1998, S.168

<sup>46</sup> Yi et al.: Thermoelastic instabilities in automotive disk brakes, 2003, S.9

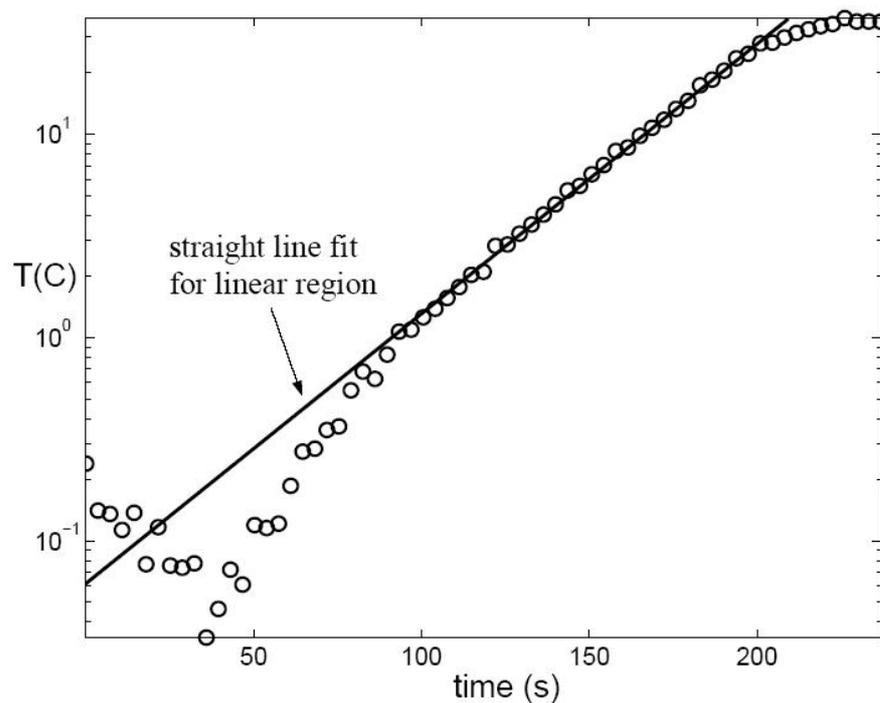


Abbildung 2.13: Logarithmische Darstellung der 7. Ordnung der Amplitude der Temperaturschwankung bei einer Schleppbremsung<sup>47</sup>

### 2.3.1.2 Thermoelastodynamic Instabilities

Der Mechanismus der „Thermoelastodynamic Instability“ (TEDI)<sup>48</sup> stellt eine Erweiterung der TEI dar. Dabei wird eine Kopplung von thermoelastischen und elastodynamischen Effekten vorgenommen, da der TEI-Mechanismus keine dynamischen Effekte berücksichtige, sondern quasistatische Annahmen beinhalte. Oftmals würden thermoelastische Verformungen in der Analyse von dynamischen Instabilitäten, beispielsweise im Zusammenhang mit Bremsenquietschen, vernachlässigt werden<sup>49</sup>. Nach dem TEI-Mechanismus führe die typische schiefssymmetrische Eigenform der Brems Scheibe zu gleichmäßig über den Umfang verteilten Hotspots, welche über den Kontakt mit den Bremsbelägen Vibrationen erzeugten, die sich dann als Heißrubbeln bemerkbar machten. Dieser Vorgang werde jedoch nur einseitig betrachtet, d.h. es würden nur die durch Scheibendeformationen hervorgerufenen Schwingungsanregungen betrachtet. Durch die Kopplung der thermoelastischen und elastodynamischen Mechanismen könne unter

<sup>47</sup> Yi et al.: Thermoelastic instabilities in automotive disk brakes, 2003, S.9

<sup>48</sup> Afferante, L.: Sliding thermoelastodynamic instability, 2006, S.2161-2176

<sup>49</sup> Afferante, L.: Sliding thermoelastodynamic instability, 2006, S.2162

anderem die beidseitige Interaktion zwischen Scheiben und Belägen berücksichtigt werden, da diese wiederum auch zu einer Schwingungsanregung der Scheibe führten.

Unter Berücksichtigung beider Mechanismen hätten Berechnungen an einem einfachen Modell ergeben, dass bestimmte Formen von TEDI bereits bei Geschwindigkeiten unterhalb der kritischen Geschwindigkeiten für TEI aufgetreten seien. Obwohl diese Instabilitäten unter anderem thermisch bedingt worden wären, hätten die resultierenden Vibrationsfrequenzen eher im Bereich des Bremsenquietschens als in Bereichen des Bremsrubbels gelegen. Als Bezeichnung dieser Vibrationen wird in diesem Zusammenhang deshalb „hot squeal“ (Heißquietschen) anstatt „hot judder“ (Heißrubbeln) eingeführt<sup>50</sup>. Experimentelle Überprüfungen liegen nicht vor.

### 2.3.1.3 Thermoelastic Instable Buckling

Der Begriff „Thermoelastic Instable Buckling“<sup>51</sup> bezeichnet die Reaktion der Brems-scheibe auf eine ungleichförmige Druck- und Temperaturverteilung, was schließlich zu Heißrubbeln führe. Aufgrund von thermischen Verformungen durch Reibungswärme, mechanischen Verformungen durch Spannkkräfte, Verschleiß der Reibmaterialien und Bildung eines Übertragungsfilms sowie anfänglicher Scheibendickenschwankungen (DTV) und Scheibenschlag, komme es selten zu einer gleichmäßigen Flächenpres-sungsverteilung<sup>52</sup>. Zu Beginn einer Bremsung seien jedoch die anfänglichen DTV noch gering und Bremsbelag und -scheibe lägen relativ eben aneinander, sodass die Flächen-pressung nur leicht schwanke. Da die Gleitgeschwindigkeit mit dem Radius zunehme und der Druck an dickeren Stellen der Scheibe größer sei, befinde sich der Ort der höchsten Wärmeentwicklung tendenziell zwischen dem mittleren und äußeren Schei-benradius (der Autor berücksichtigt bei seiner Betrachtung jedoch nicht, dass mit wach-sendem Radius sich auch der betrachtete Bremsscheibenumfang vergrößert. Eine ten-denziell stärkere Wärmeentwicklung an äußeren Scheibenradien kann nicht unmittelbar aus der Gleitgeschwindigkeit abgeleitet werden). Die stärkere Wärmeentwicklung im Bereich der äußeren Radien führe zu einer Konzentration der Flächenpressung in diesen Bereichen, die thermisch bedingt, im Verhältnis zur Umgebung stärker anwüchsen, so dass es zu einer immer ungleichmäßigeren Temperaturverteilung komme. Es bildeten sich somit über den Umfang der Scheibe Hotbands aus<sup>53</sup>. Diese wanderten aufgrund von

---

<sup>50</sup> Afferante et al.: Sliding thermoelastodynamic instability, 2006, S.2171

<sup>51</sup> Kao, T. Brake disc hot spotting and thermal judder, 2000

<sup>52</sup> Kao, T. Brake disc hot spotting and thermal judder, 2000, S.278

<sup>53</sup> Kao, T. Brake disc hot spotting and thermal judder, 2000, S.285/286

thermoelastischen Instabilitäten (TEI) in radialer Richtung, da sich analog zur Konzentration der Flächenpressung auch der Verschleiß in diesen Bereichen konzentriert<sup>54</sup>. Die beschriebene Ausprägung der ungleichförmigen Druckverteilung sowie das Wandern der Kontaktbereiche aufgrund von TEI zeigt die in Abbildung 2.14 dargestellte Simulation.

Die Darstellung zeigt die Flächenpressungsverteilung [N/mm<sup>2</sup>] der Faustseite und beruht auf einer FEM-Berechnung für eine Bremsdauer von 45 s und einem Bremsdruck von 1 N/mm<sup>2</sup> (10 bar).

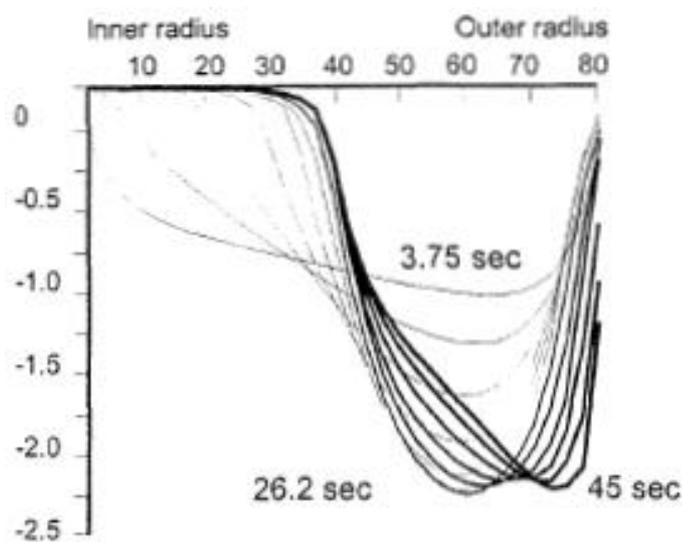


Abbildung 2.14: Entwicklung der Flächenpressungsverteilung während einer Bremsung<sup>55</sup>

Auch in Umfangsrichtung der Scheibe führten Unregelmäßigkeiten in der Flächenpressungsverteilung dazu, dass sich auf beiden Seiten der Bremsscheibe Temperaturspitzen ausbildeten. Durch einen Vorgang, der vom Autor nicht erläutert wird, komme es auf diese Weise zu regelmäßig über den Umfang verteilten Hotspots, die auf beiden Reibringen der Bremsscheibe gegeneinander phasenversetzt seien. Aufgrund dieser phasenversetzten, ungleichmäßigen Temperaturverteilung beule und verwölbe sich die Bremsscheibe (Abbildung 2.15), was die Hotspots im weiteren Verlauf des Bremsvorgangs weiter verstärkte<sup>56</sup>.

<sup>54</sup> Kao, T. Brake disc hot spotting and thermal judder, 2000, S.287

<sup>55</sup> Kao, T. Brake disc hot spotting and thermal judder, 2000, S.286

<sup>56</sup> Kao, T. Brake disc hot spotting and thermal judder, 2000, S.292

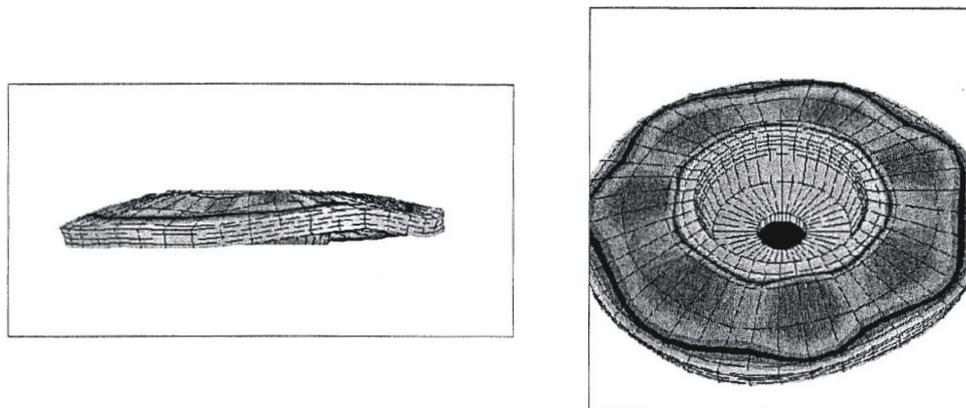


Abbildung 2.15: Ergebnisse der 3D-Berechnung: Scheibentemperatur und -verformung

Die im Rahmen der Arbeit begleitenden experimentellen Untersuchungen zeigen, dass Verknüpfungen zwischen Temperaturschwankungen, Scheibenverformungen und Bremsmomentschwankungen existieren, sie liefern jedoch keinen Aufschluss über die Ursache der Entstehung von Hotspots.

### 2.3.2 Mehrfeldtheorie

Im Rahmen der Mehrfeldtheorie<sup>57</sup> wird eine weitere Hypothese zur Hotspotentstehung vorgestellt. Danach existiere eine Reihe von sich während der Bremsung gegenseitig beeinflussenden Größen, wie in der Abbildung 2.16 dargestellt. Durch den anliegenden Bremsdruck werde die kinetische Energie des Fahrzeugs in Reibarbeit umgewandelt, die zum großen Teil als Wärme über die Reibringoberfläche geleitet werde. Das führe naturgemäß zu einer in Umfangsrichtung gleichförmigen Erwärmung der Scheibe. Durch die Wärmedehnung finde eine Zunahme der Scheibendicke statt. Infolge der Massenträgheit des Belages resultiere aus der dynamischen Aufdickung der Scheibe ein leicht erhöhter Bremsdruck. Da die Normalkräfte an den Belägen aber insgesamt im Gleichgewicht sein müssten, werde sich aufgrund des erhöhten Drucks an der Reibringoberfläche der Belag von der Reibringoberfläche wegbewegen, bis es wieder zum Gleichgewicht zwischen der Druckkraft an der Scheibe und der am Bremskolben anliegenden Druckkraft komme.

---

<sup>57</sup> Steffen, T.: Untersuchung der Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben, 1998

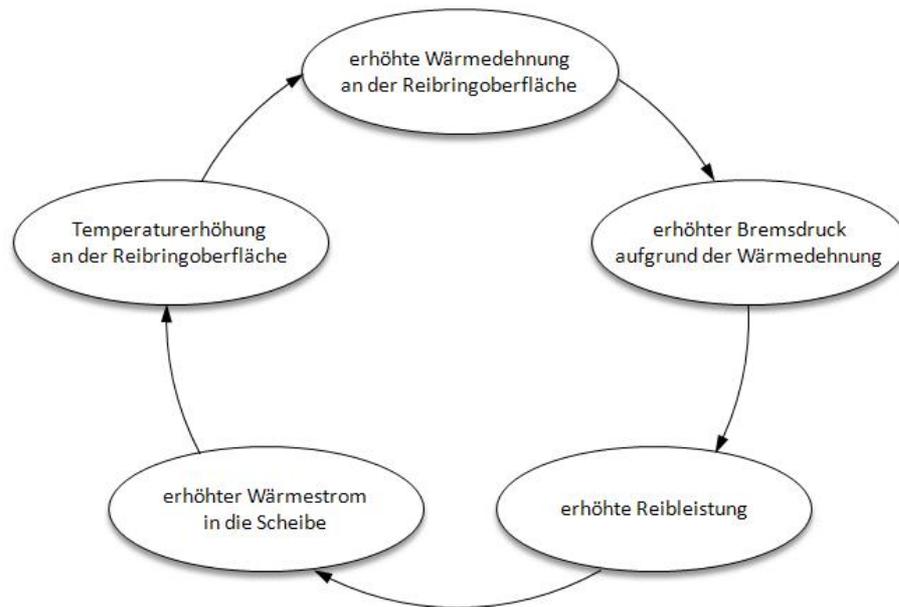


Abbildung 2.16: Geschlossene Kette der sich gegenseitig beeinflussenden Größen während des Reibprozesses ohne Störung<sup>58</sup>

Anders sehe es aus, wenn dem System, wie in Abbildung 2.17 gezeigt, für einen kurzen Moment eine Störung, z.B. eine ungleichförmige Temperaturverteilung in Umfangsrichtung, aufgeprägt werde. Daraus resultiere aufgrund der unterschiedlichen Wärmedehnung eine ungleichförmige Verformung der Reibringoberfläche. Es entstünden lokale Erhöhungen und Vertiefungen. Beim Kontakt mit dem Bremsbelag entstünden somit lokale Druckmaxima bzw. -minima an den Erhöhungen bzw. den Vertiefungen. So würden also auch in den Bereichen der Erhöhungen die Reibleistung und der Wärmestrom steigen, bei den Vertiefungen entsprechend abnehmen.

Das System werde die entstandene Störung entweder ausgleichen, d.h. in den folgenden Scheibenumdrehungen würden die Amplituden der Störgröße abnehmen und es werde wie oben beschrieben zu einer gleichförmigen Temperaturverteilung kommen. Oder es werde eine einmal entstandene lokale Topografieerhöhung fortwährend stärker erwärmt als die umliegenden Bereiche, eine Vertiefung fortwährend weniger erwärmt. Im Gegensatz zu dem Schema im Abbildung 2.17 finde hier kein kompletter Ausgleich durch das Bewegen des Bremsbelages statt. Der träge Bremsbelag werde sich so einstellen, dass die Summe der aus den Verformungen resultierenden Druckänderungen null ist. Druckschwankungen in Umfangsrichtung würden somit also nicht vollständig eliminiert. Auf diese Weise komme es zur Hotspotstehung.

<sup>58</sup> Vgl. Steffen, T.: Untersuchung der Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben, 1998, S.26

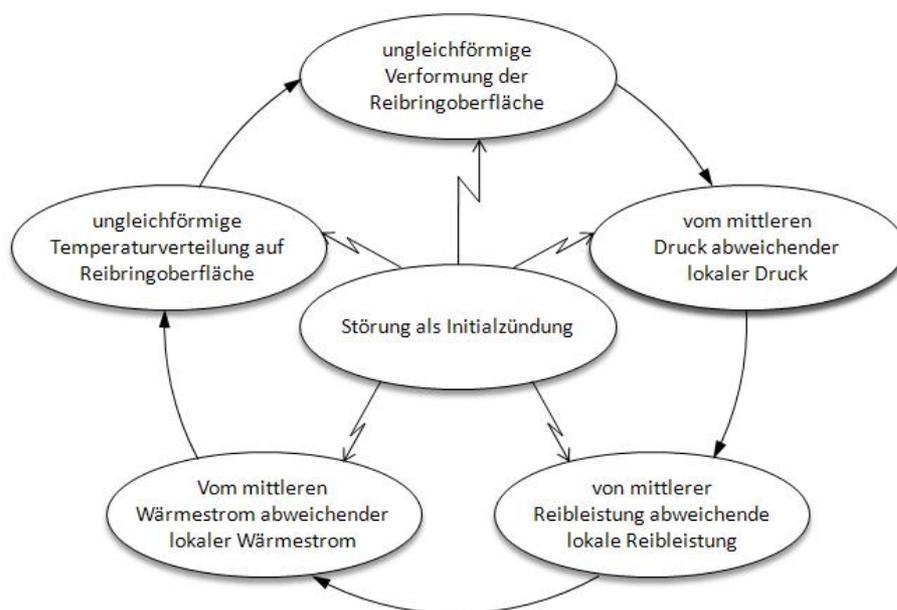


Abbildung 2.17: Geschlossene Kette der sich gegenseitig beeinflussenden Größen während des Reibprozesses mit Störung<sup>59</sup>

Dieses Phänomen habe eine Grenze aufgrund der "dämpfenden" Wirkung der Temperaturabhängigkeit der Reibungszahl der Paarung Belag/Scheibe. Ab einer Temperatur von ca. 400 °C nehme die Reibungszahl ab. Das führe dazu, dass sich ab diesem Temperaturniveau in den Hotspots die benachbarten Bereiche wieder stärker erwärmen als die Hotspots, und sich so insgesamt im weiteren Verlauf eine in Umfangsrichtung gleichförmige Temperaturverteilung und Verformung der Reibringoberfläche ergebe.

Im Rahmen der Arbeit wurden auch Prüfstandversuche durchgeführt. Als Ergebnis wird zusammenfassend beschrieben, dass die das Erscheinen der Hotspots mehr oder weniger stark beeinflussenden Parameter "Dicke der Scheibe" und "Dicke des Belags" sind. Die Gesamtgeometrie der Scheibe hat weniger Einfluss auf die Tendenz der Hotspotbildung als vielmehr auf die Anzahl der auftretenden Hotspots.<sup>60</sup>

Die Ursache dafür, dass sich die Bremsscheibe nicht gleichförmig erwärmt, sondern sich darauf Hotspots bilden, konnte durch die Versuche nicht ermittelt werden.<sup>61</sup>

<sup>59</sup>Vgl. Steffen, T.: Untersuchung der Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben, 1998, S.27

<sup>60</sup> Steffen, T.: Untersuchung der Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben, 1998, S.24

<sup>61</sup> Steffen, T.: Untersuchung der Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben, 1998, S.26

### 2.3.3 Progressive Waviness Distortion

Nach der als „Progressive Waviness Distortion“<sup>62</sup> bekannten Modellvorstellung zur Beschreibung des Entstehungsmechanismus von Hotspots unterteilt sich der Entstehungsprozess zunächst in die drei Phasen:

- 1) „Two-wave disk bending“ (Scheibenwelligkeit zweiter Ordnung)
- 2) „Transition from two waves to a higher number of waves and warpage“ (Übergang von zweiter zu höherer Welligkeitsordnung und Verwölbung)
- 3) „hot spot stabilization“<sup>63</sup> (Hotspotstabilisierung)

#### Phase 1

Die Bremsscheibe wird als isotrope und homogene Platte konstanter Dicke  $h$  angenommen, welche lateral durch die Bremsbeläge mit einer Flächenpressung  $p(r, \varphi)$  belastet werde und aufgrund reibungsinduzierter Wärme eine Temperaturverteilung  $T(r, \varphi, z)$  aufweise. Die Gleichgewichtsbedingung der Platte unter lateraler Belastung und ebenen Kräften ergebe sich demnach zu

$$D\nabla^4 w - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r N_r \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \frac{N_\varphi}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + \nabla^2 M_T - p = 0 \quad (2.2)$$

Darin ist  $D$  die Plattensteifigkeit,  $\nabla$  der Nabla-Operator,  $w$  die Auslenkung der Platte,  $N_\varphi$  und  $N_r$  die tangentialen und radialen Membrankräfte und  $M_T$  das thermisch bedingte Moment, welches definiert ist als

$$M_T = \frac{E\alpha}{1-\nu} \int_{-h/2}^{h/2} Tz \, dz \quad (2.3)$$

Aus (2.3) ist erkennbar, dass  $M_T$  Null wird und somit aus (2.2) verschwindet, wenn die Temperaturverteilung  $T$  symmetrisch zur Mittelebene der Scheibe ist. Da in einem solchen Fall nur Kräfte in der Scheibenebene wirken, könnten daraus auch nur ebene Verformungen der Scheibe resultieren. Ein Ausbeulen der Platte durch ausreichend große, thermisch induzierte Druckspannungen seien aufgrund der Dimensionen der Bremsscheibe ausgeschlossen<sup>64</sup>. Eine laterale Verformung könne daher nur durch das thermische Moment  $M_T$  erzeugt werden.

<sup>62</sup> Panier, S.: Progressive Waviness Distortion, 2004

<sup>63</sup> Panier, S.: Progressive Waviness Distortion, 2004, S.52

<sup>64</sup> Panier, S.: Progressive Waviness Distortion, 2004, S.52/53

Da die Bremsscheibengeometrie aufgrund ihrer Anbindung nicht symmetrisch sei (die im speziellen Fall untersuchten TGV-Bremsscheiben sind paarweise am Topf miteinander verbunden) und somit auch nicht die Temperaturverteilung, ergebe sich, dass  $M_T \neq 0$ . Dadurch komme es im Kontaktbereich zwischen Scheibe und Belägen zu einer Auslenkung der Scheibenmittelebene.<sup>65</sup> Abbildung 2.18 zeigt die erste Phase der PWD mit der resultierenden Scheibenwelligkeit zweiter Ordnung.

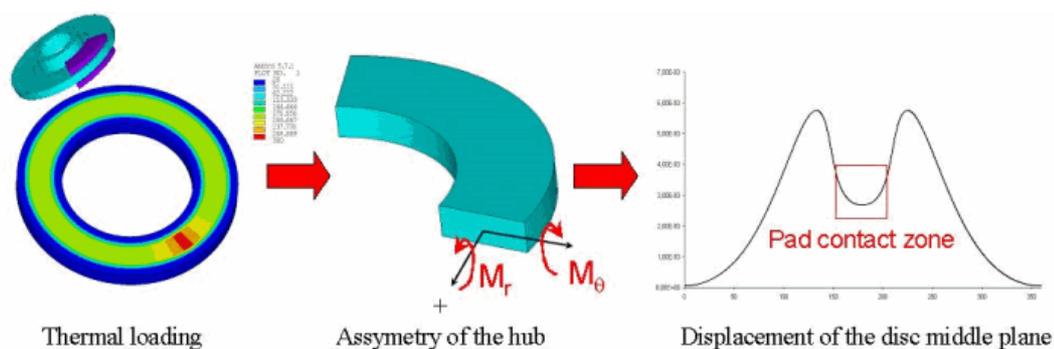


Abbildung 2.18: Phase 1 der PWD<sup>66</sup>

## Phase 2

Ist die thermische Belastung der Bremsscheibe groß genug, komme es zu plastischen Verformungen und die Welligkeit zweiter Ordnung werde stationär. Infolge dessen komme es von der mit der Scheibenverformung abhängigen Flächenpressungsverteilung zu jeweils zwei angularen Temperaturgradienten pro Reibring, die schief-symmetrisch zur Scheibenmittelebene angeordnet seien. Wie schon in Phase 1, würden diese Gradienten jeweils ein thermisch induziertes Biegemoment hervorrufen, welche erneut zu einer lokalen Verwellung zweiter Ordnung führe, so dass global eine Welligkeit sechster Ordnung entstehe, was letztlich zu sechs Hotspots führe<sup>67</sup>. Dieser Vorgang ist in Abbildung 2.19 dargestellt.

<sup>65</sup> Panier, S.: Progressive Waviness Distortion, 2004, S.53

<sup>66</sup> Panier, S.: Etude théorique et expérimentale des points chauds, 2004, S.8

<sup>67</sup> Panier, S. Progressive Waviness Distortion 2004, S.53/54

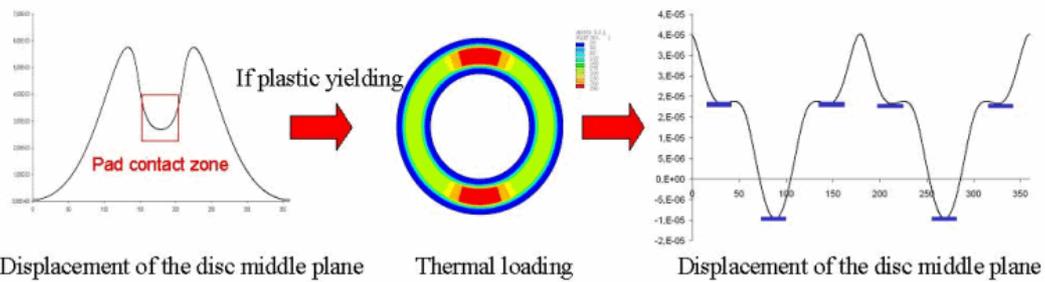


Abbildung 2.19: Phase 2 der PWD<sup>68</sup>

### Phase 3

Nach der Ausprägung der 6 Hotspots komme es zu keiner weiteren Veränderung der Wellenheitsordnung und aufgrund plastischer Verformungen würden die Hotspots stationär.<sup>69</sup>

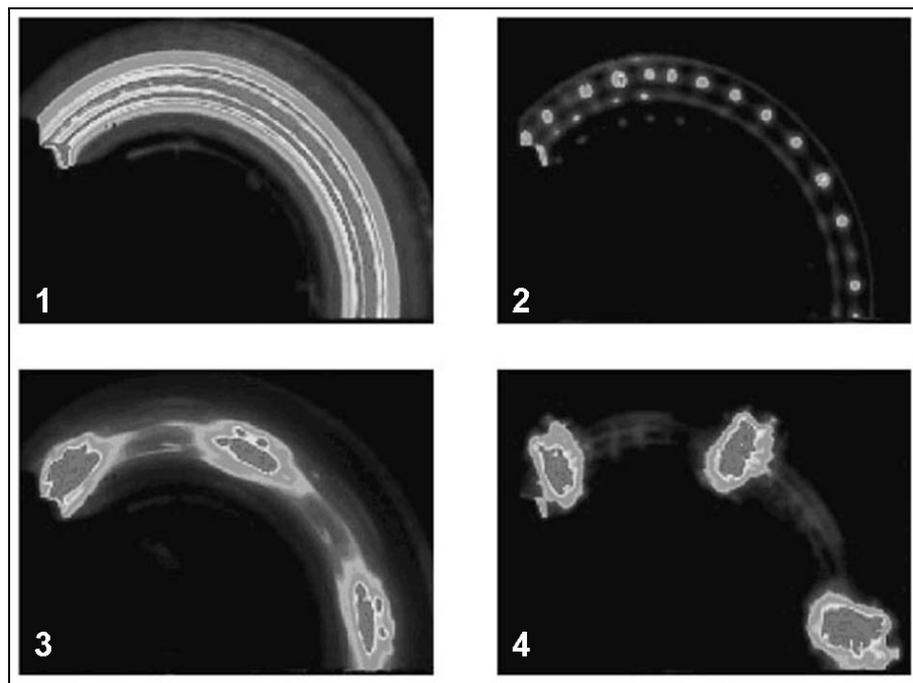


Abbildung 2.20: Thermobildaufnahme zur Hotspoterkennung<sup>70</sup>

<sup>68</sup> Panier, S. Etude théorique et expérimentale des points chauds. 2004, S.8

<sup>69</sup> Panier: Progressive Waviness Distortion 2004, S.54

<sup>70</sup> Panier: Investigation of hot spots, 2004, S.768

Nach der PWD-Theorie entstehen Hotspots bei Folgebremisungen infolge von Effekten der plastischen Verformung immer an den gleichen Stellen.<sup>71</sup> Abbildung 2.20 zeigt die Visualisierung der Temperaturverteilung auf der damit erfassten Bremsscheibenseite für verschiedene Phasen der Hotspotbildung.

Eine begleitende Messung der Bremsscheibenverformung während des Bremsvorgangs erfolgt dabei nicht, so dass eine Gegenüberstellung der Modellvorstellung zu den experimentellen Ergebnissen hinsichtlich Welligkeitsbildung nicht möglich ist.

## 2.4 Fazit zum Stand der Forschung

Das Auftreten von Hotspots und Heißrubbeln stand insbesondere in den vergangenen zwei Jahrzehnten im Mittelpunkt zahlreicher Untersuchungen. Experimentelle Studien dienten vorwiegend der Ermittlung von Parametern, die die Hotspotbildung beeinflussen. Die Ergebnisse führen zu der Schlussfolgerung, dass Hotspots bei Bremsungen mit hohen Geschwindigkeiten bei geringer bis mittlerer Verzögerung auftreten. Es bestehen Abhängigkeiten (Übereinstimmung der Ordnungen) zwischen den Temperaturschwankungen (Hotspotanzahl), Bremsscheibenverformung, Bremsmoment- und Bremsdruckschwankungen und gegebenenfalls Geräusch. Die Versuchsergebnisse liefern zudem Informationen zum Einfluss von geometrischen Eigenschaften von Komponenten, wie etwa Bremsscheibendurchmesser und Bogenlänge des Bremsbelags. Außerdem werden physikalische Eigenschaften der Komponenten betrachtet. So herrscht z.B. darüber Einigkeit, dass eine Erhöhung der Bremsbelagsteifigkeit die Hotspotbildung begünstigt.

Zur Ursache der Hotspotentstehung existieren mehrere, in ihren jeweiligen Grundannahmen unterschiedliche Modellvorstellungen. Bei keinem der bekannten Modelle wird eine Methode zur Überprüfung der jeweiligen Gültigkeit vorgelegt oder gar angewendet. Somit ist eine belastbare Aussage nicht darüber möglich, ob die vorhandenen Modellvorstellungen die tatsächlichen Mechanismen der Hotspotbildung wiedergeben.

---

<sup>71</sup> Panier: Investigation of hot spots, 2004, S.767

## **3 Zielsetzung und Methodik**

### **3.1 Zielsetzung der Arbeit**

Aus dem Stand der Forschung zu Heißrubbeln leitet sich der Themenfokus der vorliegenden Arbeit ab. Es fehlt nicht an Modellvorstellungen zur Beschreibung des Entstehungsprozesses von Hotspots. Und auch die begleitend zur Entwicklung der Modelle durchgeführten experimentellen Untersuchungen lieferten Ergebnisse, die den jeweiligen Modellen nicht widersprechen. Methoden zur Überprüfung der Modelle mit systematisch herausgearbeiteten falsifizierbaren Vorhersagen werden jedoch weder angewendet noch vorgeschlagen. Aus diesem Grunde sind Aussagen zu Validität der vorhandenen Modelle bezüglich der Ursache der Hotspotbildung nicht möglich. Daher werden in dieser Arbeit die Modelle auf falsifizierbare Vorhersagen analysiert und entsprechend experimentell überprüft.

Bei experimentellen Untersuchungen bestehen außerdem oftmals Fragen hinsichtlich der Objektivität der Ergebnisdarstellung. Insbesondere die Analyse der Temperaturverteilung auf der Bremsscheibenoberfläche erfolgte meistens durch die rein visuelle Betrachtung von Thermobildern. Dadurch werden Ergebnisse, wie etwa die Bestimmung der Hotspotanzahl, von Interpretationen der auswertenden Personen abhängig. In vielen Fällen birgt dies Potential für Fehler, da trotz der weitgehenden Regelmäßigkeit der Verteilung über den Bremsscheibenumfang, die einzelnen Hotspots häufig sehr unterschiedliche Größen, Formen, absolute Spitzentemperaturen und Temperaturunterschiede zu umgebenden Bereichen aufweisen. Deshalb besteht die Zielsetzung, die Temperaturverteilung auf den Bremsscheibenoberflächen während des gesamten Bremsvorgangs objektiv auszuwerten.

Die inhomogene Temperaturverteilung ist mit entsprechenden lokal erhöhten thermischen Ausdehnungen und Bremsscheibenverformungen verknüpft, welche letztendlich zu den als Heißrubbeln bezeichneten bremsinduzierten Vibrationen führen. Daher ist eine weitere Zielsetzung, gleichzeitig Temperaturverteilungen und thermische Ausdeh-

nungen bzw. Bremsscheibenverformungen zu messen, um die Entwicklung des Hotspotbildungsprozesses zu analysieren.

Den in der betrachteten Literatur vorgestellten Untersuchungen ist nicht zu entnehmen, dass eine Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse durch Wiederholung der Versuchsreihen unter gleichen Randbedingungen mit mehreren, baugleichen Komponenten erfolgt ist. Dies schränkt die Reliabilität von getroffenen Aussagen ein, so dass die Erforschung der Reproduzierbarkeit des Auftretens von Hotspots unter den oben genannten Bedingung als Basis für weiterführende Untersuchungen dient.

Alle Teilziele dienen dem verbesserten Verständnis für die Hotspot-Entstehung in Scheibenbremsen unter praxisnahen Betriebsbedingungen und sollen eine nachvollziehbare Ursache-Wirkungs-Kette liefern, um letztlich daraus Hinweise zu gewinnen, welche Maßnahmen geeignet wären, das Auftreten von Hotspots zu vermeiden oder zu vermindern.

## **3.2 Methodik**

Die Auswertung der bekannten Fachliteratur verdeutlichte, dass Modellvorstellungen zur Erklärung des Entstehungsprozesses von Hotspots in ihren Grundannahmen divergieren. Da diese Modelle experimentell nicht oder nur anhand weniger Experimente überprüft worden sind, werden aus diesen Vorhersagen getroffen und deren Gültigkeit experimentell überprüft.

Eine unabdingbare Anforderung an die zu treffenden Vorhersagen besteht darin, dass diese mittels logischer Deduktion aus den Modellen abgeleitet werden, d.h. die Gültigkeit des Modells ist unmittelbar mit der Erfüllung der aus ihm abgeleiteten Vorhersage verknüpft. Darüber hinaus muss die Falsifizierbarkeit<sup>72</sup> der Vorhersagen gegeben sein, d.h. es muss die Möglichkeit bestehen, dass sie anhand der Anwendung einer Falsifikationsmethode entweder widerlegt werden oder sich bewähren.

Bewähren sich nach Anwendung der Falsifikationsmethode die getroffenen Vorhersagen zu einem der Modelle (oder gar zu mehreren, falls etwa in Abhängigkeit von Randbedingungen unterschiedliche Mechanismen zur Hotspotbildung führen), so bleibt die Modellvorstellung (vorläufig) gültig und kann als Erklärung für die Ursache(n) für die Hotspotbildung gelten. Widerlegen die experimentellen Ergebnisse dagegen die getroffenen Vorhersagen, so ist das mit der Vorhersage verknüpfte Modell zumindest im

---

<sup>72</sup> Popper: Logik der Forschung, 1934, S. 47ff

Bezug auf den betrachteten Aspekt falsifiziert. In einem solchen Fall kann die Formulierung weiterer Hypothesen unter Einbeziehung von aus Versuchergebnissen generierten Erkenntnissen erforderlich oder sinnvoll sein. Diese können gegebenenfalls zu neuen Modellvorstellungen führen, die wiederum grundsätzlich anhand der gleichen Methodik zu überprüfen sind.

Da der Erreichungsgrad des Ziels anhand der Kriterien Objektivität, Reliabilität und Validität zu bewerten ist, sollen diese im Vorgehen besonders berücksichtigt werden. Die im vorigen Kapitel definierte Zielsetzung gibt vor, dass die experimentellen Untersuchungen unter praxisrelevanten Randbedingungen zu erfolgen haben. Dies stellt zur Validität der Ergebnisse eine zu erfüllende Bedingung und bedeutet, dass ein in allen wesentlichen Eigenschaften dem Serienstand entsprechendes Bremssystem eingesetzt werden muss. Außerdem muss die Möglichkeit gewährleistet sein, das System unter für das Auftreten von Heißrubbeln begünstigenden Bedingungen zu betreiben. Dies betrifft unter Einbeziehung der Fahrzeugmasse z.B. Geschwindigkeits- bzw. Drehzahlbereich sowie Bremsmoment bzw. hydraulischen Bremsdruck. Darüber hinaus sind die Größen zu ermitteln, die für die Überprüfungen getroffener Vorhersagen wesentlich sind und deren Erfassung zu gewährleisten.

Die Sicherstellung von Objektivität, also der Unabhängigkeit einer Aussage vom Betrachter, erfolgt bei der Auswertung von Messsignalen durch die Anwendung von Verfahren, die diese Neutralität bei der Interpretation der Aussagen gewährleisten. Aufgrund der durch Hotspotbildung hervorgerufenen Periodizität in den Verläufen von Temperaturschwankungen sowie den damit gekoppelten Brems Scheibendeformationen, Druck- und Momentschwankungen bietet sich hierfür vorrangig die Anwendung von Fourier-Transformationen an.

Die Reliabilität der Untersuchungen soll sowohl durch Validation des Messverfahrens als auch durch die Wiederholung der Experimente unter gleichen Randbedingungen überprüft werden. Somit soll sichergestellt sein, dass die Ergebnisse frei von Zufallsfehlern sind.

Abbildung 3.1 zeigt schematisch die im Rahmen dieser Arbeit angewendete Methodik.

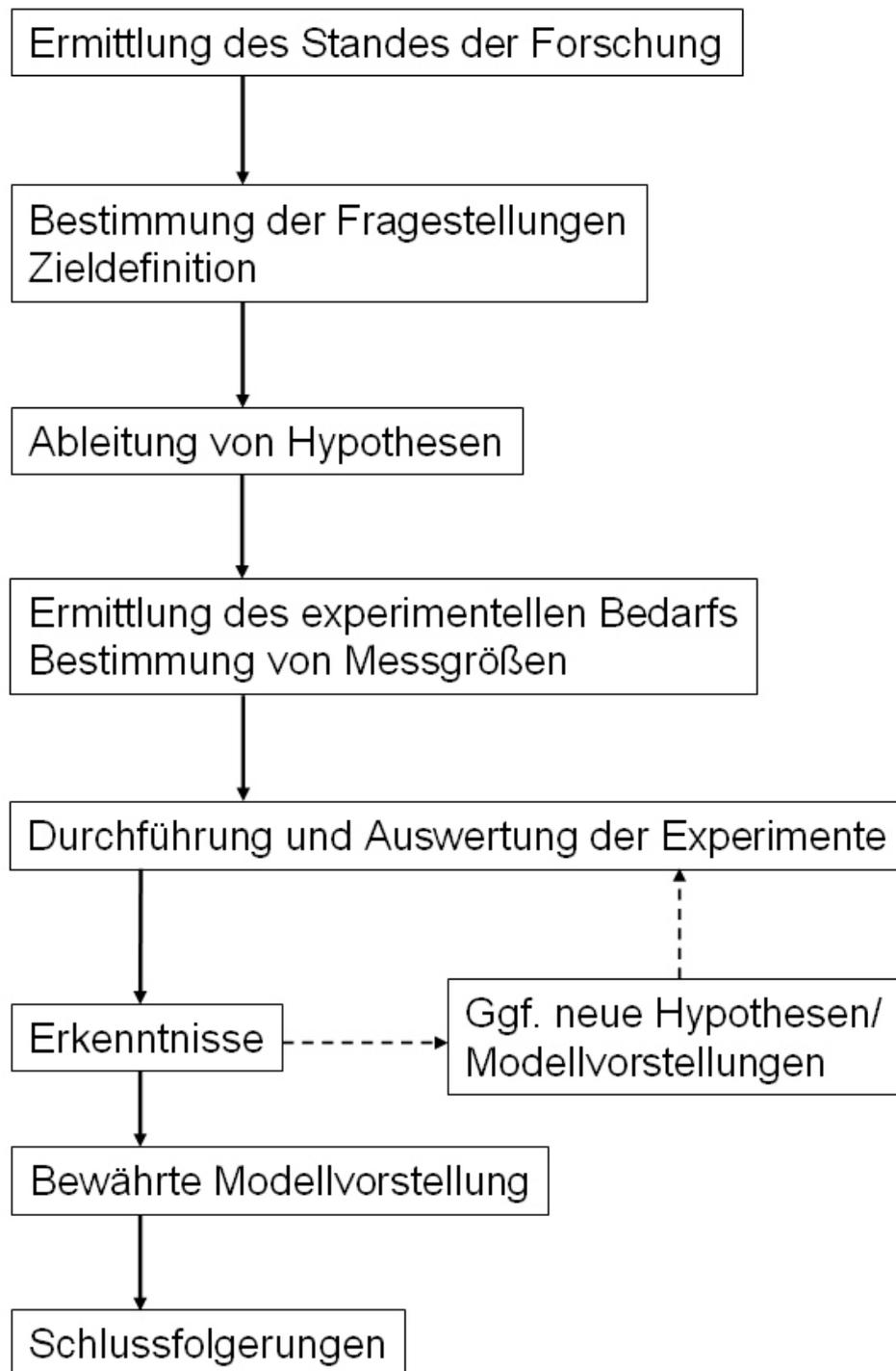


Abbildung 3.1: Methodik des Vorgehens

## 4 Hypothesenbildung

In diesem Abschnitt werden Hypothesen zur Ermittlung der Ursache-Wirkungs-Kette der Entstehung von Hotspots formuliert. Die Ableitung der Hypothesen erfolgt durch Treffen von Vorhersagen, deren Erfüllung für das Bewähren bekannter Modellvorstellungen Voraussetzung ist. Die Falsifikation einer Hypothese impliziert demzufolge unmittelbar, dass die Modellvorstellung, aus der die Vorhersage abgeleitet wurde, zumindest im Bezug auf das betrachtete System falsifiziert und somit ihre Allgemeingültigkeit nicht gegeben ist.

Die im Folgenden formulierten Hypothesen setzen grundsätzliche Kenntnisse über das Bremssystemverhalten bezüglich der Neigung zur Hotspotbildung voraus. Dazu ist zunächst eine Untersuchung darüber erforderlich, ob und unter welchen Bedingungen Hotspots auftreten. Dazu gehört eine Variation von Parametern wie Geschwindigkeit, Bremsdruck und Art der Bremsung (Stopp- oder Dauerbremsung bei konstanter Geschwindigkeit – so genannte „Schleppbremsung“). Außerdem wird geprüft, ob die sich beim eingesetzten Bremssystem bildenden Hotspots eine (wie oftmals in der Literatur beschriebene) regelmäßige, annähernd äquidistante Verteilung in Umfangsrichtung aufweisen, sowie ob das gleichzeitige Auftreten von Hotspots auf beiden Brems Scheibenreibringen phasenversetzt in Umfangsrichtung erfolgt. Darüber hinaus ist die Reproduzierbarkeit von Merkmalen des Auftretens von Hotspots bei Experimenten unter gleichen Randbedingungen zu untersuchen. Solche Merkmale sind beispielhaft Hotspotanzahl und Amplitude der Temperaturschwankungen.

### 4.1 Hypothesen zu Hotspotbildung bei aufeinanderfolgenden Bremsungen

**Motivation:** Die bekannte Literatur liefert Hinweise darauf, dass die Hotspotbildung (insbesondere die Position der sich bildenden Hotspots) von der Vorbelastung des Systems bestimmt wird. Nach der PWD-Theorie<sup>73</sup> entstehen Hotspots bei Folgebremssungen aufgrund von plastischen Verformungen immer auf den gleichen Stellen (eine Präzisierung des Begriffes „gleiche Stellen“ z.B. durch Angabe eines Toleranzbereiches, erfolgt dabei jedoch nicht). Ein experimenteller Beleg besteht nicht. Zur Überprüfung dieser

---

<sup>73</sup> Panier: Investigation of hot spots, 2004, S.767

Behauptung bzw. zur Untersuchung des Einflusses von Vorbelastungen auf die Position der sich bildenden Hotspots dienen folgende Hypothesen:

**Hypothese 1.1:** Hotspots entstehen bei aufeinanderfolgenden Bremsungen immer an den gleichen Stellen.

**Hypothese 1.2:** Es gibt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den Positionen der Hotspots bei aufeinanderfolgenden Bremsungen, der durch eine definierte Phasenverschiebung beschrieben werden kann.

**Falsifikationsmethode:** Visuelle Betrachtung der Temperaturverteilung in Umfangsrichtung im Bereich der Hotspots und Auswertung der Phasenlage von sich einstellenden Temperaturschwankungen auf den Brems scheibenreibflächen bei aufeinanderfolgenden Bremsungen unter definierten Bremsbedingungen.

Hypothese 1.1 gilt als falsifiziert, wenn die Phasenlage der Temperaturschwankungen in Umfangsrichtung bei Folgebremungen eine Abweichung aufweist, die außerhalb eines Toleranzbandes von  $\pm\pi/6$  liegt.

Hypothese 1.2 gilt als falsifiziert, wenn kein Zusammenhang (z.B. Alternieren, Progression) bezüglich der Phasenlage der Temperaturschwankungen in Umfangsrichtung bei Folgebremungen festgestellt wird, die außerhalb eines Toleranzbandes von  $\pm\pi/6$  liegt.

## 4.2 Hypothesen zum Einfluss der Belagbogenlänge auf die Hotspotbildung

**Motivation:** Nach der Theorie der Thermoelastischen Instabilitäten ist der Abstand zwischen zwei Hotspots immer kleiner als die Länge des Bremsbelags in Umfangsrichtung. Darüber hinaus ist nach der gleichen Theorie der Abstand zwischen zwei Hotspots immer kleiner als die Länge des Bremsbelags in Umfangsrichtung.<sup>74</sup> Davon abweichende Ergebnisse stellen zu diesen Bedingungen und somit zu der genannten Theorie Widersprüche dar. Zur Untersuchung des Einflusses der Belagbogenlänge auf die Hotspotbildung sowie zur Überprüfung der Gültigkeit der Annahmen der Theorie der Thermoelastischen Instabilitäten werden folgende Hypothesen formuliert:

---

<sup>74</sup> Lee: Frictionally Excited Thermoelastic Instabilities in Disk Brakes, 1993, S.612

**Hypothese 2.1:** Die Reduzierung der Bogenlänge des Bremsbelags führt zu einer Erhöhung der Hotspotanzahl.

**Hypothese 2.2:** Der Abstand zwischen zwei Hotspots ist immer kleiner als die Länge des Bremsbelags in Umfangsrichtung.

**Falsifikationsmethode:** Bremsungen mit definierten Randbedingungen und erheblicher Variation der Belagbogenlänge. Auswertung der jeweiligen Ordnungen der Temperaturschwankungen (Hypothese 2.1) sowie des Abstandes zwischen Hotspots (Hypothese 2.2.).

Hypothese 2.1 gilt als falsifiziert, wenn die Hotspotanzahl trotz Halbierung der Belagbogenlänge unverändert innerhalb eines Toleranzbereiches von  $\pm 1$  bleibt.

Hypothese 2.2 gilt als falsifiziert, falls ein Abstand zwischen Hotspots festgestellt wird, der größer als die Länge des eingesetzten Bremsbelags in Umfangsrichtung ist.

### 4.3 Hypothesen zum Initial-Hotspot

**Motivation:** Sowohl nach der Theorie der „Progressive Waviness Distortion“ als auch nach der Mehrfeldtheorie wird die Hotspotbildung durch einen lokalen „Temperatursprung“ bzw. eine lokale Temperaturerhöhung initiiert. Die Theorien nennen verschiedene Mechanismen, die ausgehend von der Bildung eines Initial-Hotspots zur Entstehung weiterer Hotspots führen. Wird kein Temperatursprung vor Beginn der Hotspotentstehung festgestellt, liegt ein Widerspruch zu den genannten Theorien vor.

Es liegt jedoch keine Definition der Grenzen vor, welche Temperaturunterschiede bzw. welche geometrische Größen eine solche lokale Temperaturerhöhung mindestens aufweisen muss, um im Sinne der Theorien als solche zu gelten. Die Überprüfung der folgenden Hypothese erfolgt deshalb im Bezug auf die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Definition von Hotspots (s. Abschnitt 5.5.1).

**Hypothese 3:** Vor der Entstehung von periodischen Temperaturschwankungen auf den Bremsscheibenreibflächen in Umfangsrichtung wird das Auftreten eines ersten Hotspots festgestellt.

**Falsifikationsmethode:** Auswertung der Temperaturverteilung auf den Brems Scheibenreißflächen. Wird kein (isolierter) Initial-Hotspot vor der Hotspotentstehung festgestellt, gilt die Hypothese als falsifiziert.

#### 4.4 Hypothesen zu thermisch bedingten Brems Scheibendeformationen

**Motivation:** In der Literatur<sup>75 76 77</sup> wird oft angenommen, dass die Brems Scheibe beim Zustand ausgebildeter Hotspots eine wellige Form aufweist, wobei die Anzahl der Wellen mit der Hotspotanzahl identisch sei. Ein Beleg für diese Annahme wird jedoch nicht geliefert bzw. genannt. Der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Hotspotbildung und Brems Scheibendeformationen dienen folgende Hypothesen:

**Hypothese 4.1:** Die Brems Scheibe weist bei ausgebildeten Hotspots eine Verwellung auf.

**Hypothese 4.2:** Anzahl von Hotspots und Wellen stimmen überein.

**Hypothese 4.3:** Position von Hotspots und Wellenbergen stimmen überein.

Bei Bewährung der Hypothesen 4.1.-4.3:

**Hypothese 4.4:** Die Entstehung von Hotspots und die Ausbildung der Wellen erfolgen gleichzeitig.

Aus einer eventuellen Falsifikation der Hypothese 4.4 lassen sich unmittelbar folgende Hypothesen ableiten:

**Hypothese 4.5:** Temperaturschwankungen bzw. Hotspots entstehen vor der Bildung einer Oberflächenwelligkeit der gleichen Ordnung.

**Hypothese 4.6:** Die Bildung einer Oberflächenwelligkeit erfolgt vor der Hotspotentstehung bzw. bevor Temperaturschwankungen in der gleichen Ordnung entstehen.

---

<sup>75</sup> Fieldhouse: Experimental Investigation of Hot Judder, 2001, S.1

<sup>76</sup> Lee: Frictionally Excited Thermoelastic Instabilities in Disk Brakes, 1993, S.612

<sup>77</sup> Steffen: Hotspotbildung, 1998, S. 409

**Falsifikationsmethode:** Ermittlung und Vergleich der Amplitudenspektren von Temperaturverteilung und Oberflächentopografie in Umfangsrichtung der Bremsscheibe. Ergebniskontrolle durch Betrachtung der Signale im Zeitbereich.

Hypothese 4.1 gilt als falsifiziert, falls das Amplitudenspektrum im Verlauf des Bremsvorgangs im Bezug auf den Ausgangszustand keine Veränderung aufweist.

Hypothese 4.2 gilt als falsifiziert, falls keine Übereinstimmung der dominanten Ordnung im Amplitudenspektrum von jeweils Oberflächentopografie (Wellenzahl) und Temperaturschwankungen in Umfangsrichtung (Hotspotanzahl) festzustellen ist.

Hypothese 4.3 gilt als falsifiziert, falls die durch Hotspots hervorgerufene thermische Ausdehnung nicht auf den Wellenbergen entsteht, bzw. eine davon um mehr als  $\pm\pi/6$  abweichende Phasenlage aufweist.

Hypothese 4.4 gilt als falsifiziert, falls bei Gegenüberstellung der Amplitudenspektren von Temperaturschwankung und Oberflächentopografie ein Versatz von mindestens fünf Umdrehungen beim Beginn des Wachstums der der Hotspotanzahl entsprechenden Ordnung festgestellt wird. Aus der Falsifikation der Hypothese 4.4 folgt aus der Reihenfolge der Bildung von Temperaturschwankungen und Oberflächenwelligkeit die Falsifikation bzw. Bewährung der Hypothesen 4.5 und 4.6.

## 5 Untersuchungswerkzeuge und Versuchsdurchführung

### 5.1 Schwungmassenprüfstand

Die experimentelle Überprüfung der im Kapitel 4 vorgestellten Hypothesen erfolgte durch Bremsversuche in einem Schwungmassenprüfstand. Dieser besteht im Wesentlichen aus einem elektrischen Antrieb, einem Schwungmassensatz zur Speicherung von kinetischer Energie und einer Prüfzelle, in der das zu untersuchende Bremssystem sowie Messtechnik aufgebaut wird. Hauptvorteile der Anwendung des Prüfstands stellen die Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen (Geschwindigkeitsbereich, Bremsmoment bzw. Bremsdruck, Anfangstemperatur, Kühlungsverhältnisse, etc.) sowie der im Vergleich zu Fahrversuchen relativ einfache Ein-

satz von umfangreicher Messtechnik dar. Praxiserfahrungen bei der Bremsenentwicklung lieferten die Erkenntnis, dass im Bezug auf das Auftreten von Heißrubbeln eine hohe Übereinstimmung zwischen Ergebnissen aus Prüfstands- und Fahrversuch besteht.

Zur Steuerung und Regelung des Prüfstands sowie zur Messdatenaufzeichnung werden drei Softwaresysteme verwendet. Die Ansteuerung und Regelung erfolgt durch die Software X-ONE. Mit Ausnahme der Temperaturmessung durch eine Thermobildkamera werden die Signale aller Messkanäle durch die Software DIADEM aufgezeichnet. Ein in der Prüfstandswelle integrierter Impulsgeber liefert das Signal zur Bestimmung der Nullposition bei jeder Umdrehung. Das Nullpunktsignal dient auch der Synchronisation mit den Daten aus der Infrarot-Thermokamera, welche mit einer gesonderten Software (IRB2ASCII) betrieben wird. Eine schematische Darstellung des Prüfstandsaufbaus ist in der Abbildung 5.1 dargestellt.

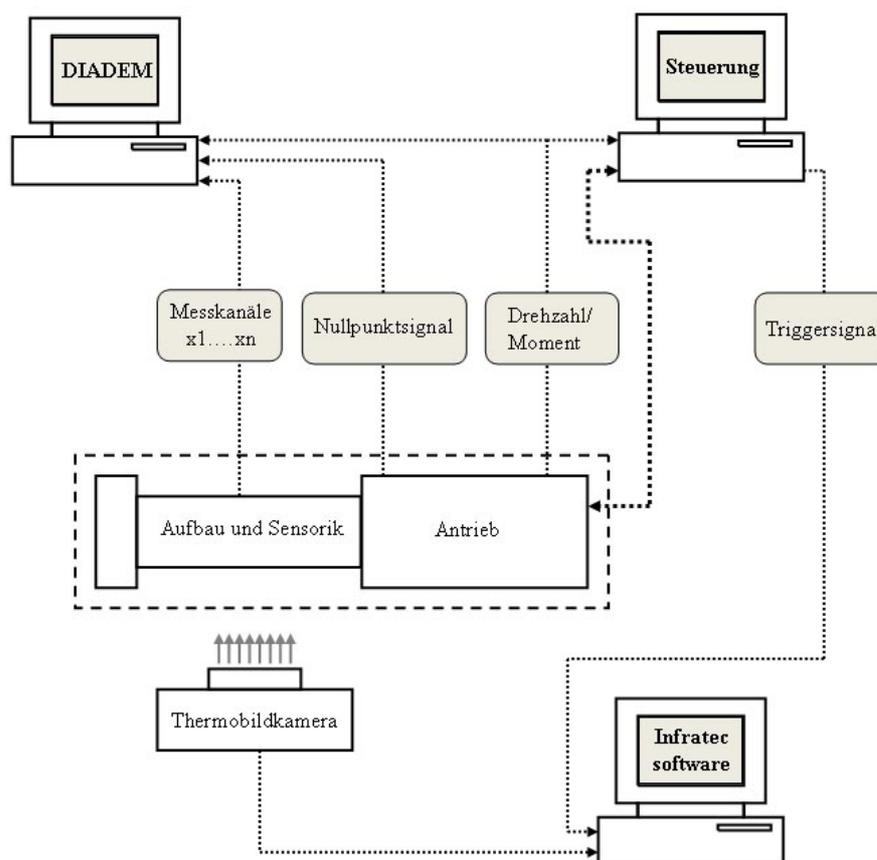


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Prüfsystems

Der hydraulische Druck zum Aufbau der Spannkraft in der Radbremse erfolgt durch einen elektrisch betriebenen Druckgeber, welcher durch Proportionalventile geregelt wird. Der für die Druckregelung benötigte Ist-Wert des Bremsdruckes wurde aus einem

Mittelwert bestimmt, der in einer definierten Anzahl der vorausgehenden Umdrehungen gebildet wurde. Die dadurch bewirkte Trägheit des Regelkreises verhinderte das „Ausregeln“ von durch Bremsscheibenverformungen verursachten Bremsdruckschwankungen. Da der Bremskreis des Prüfstandes Unterschiede zu Bremskreisen von realen Fahrzeugen aufweist (Betätigungsart und Betätigungseinrichtung, Bremsleitungen), ist eine quantitative Übertragung der Ergebnisse bezüglich der gemessenen Druckschwankungen nicht unmittelbar gegeben.

Bei den experimentellen Untersuchungen zur Überprüfung der Hypothesen wird ein 2-Zylinder-Faust-Rahmensattel eingesetzt, der in all seinen Eigenschaften dem Serienstand für diese Sattelart entspricht. Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 zeigen den Prüfaufbau in der Prüfzelle einschließlich des verwendeten Bremssattels sowie der Messaufbauten.

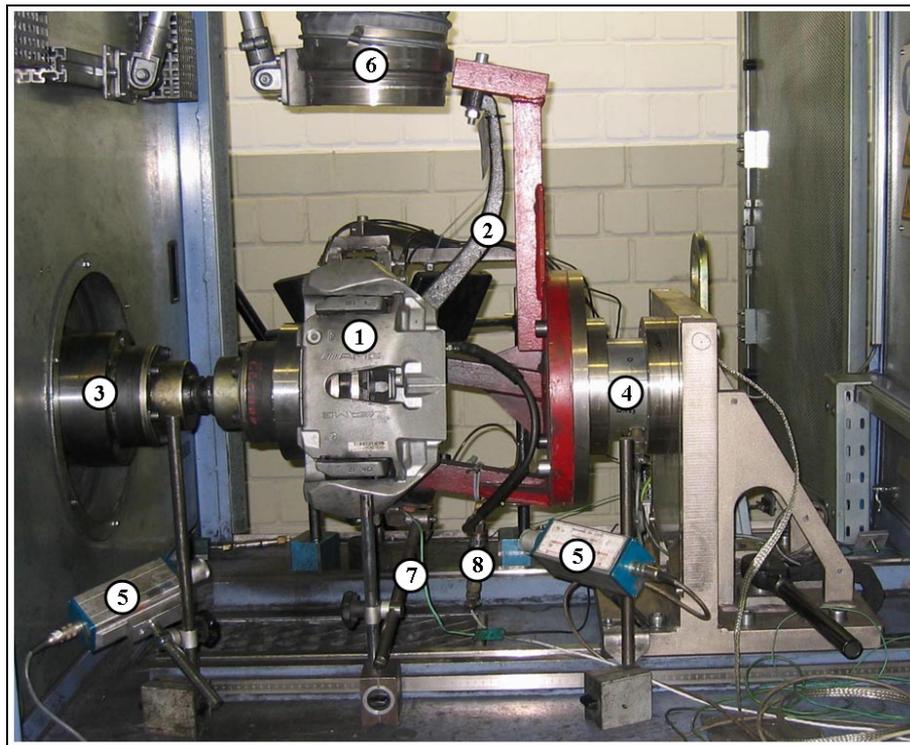


Abbildung 5.2: Prüfaufbau in der Prüfzelle des Schwungmassenprüfstands

1. Bremssattel
2. Achsschenkel
3. Antrieb

4. Momentenmesswelle (DMS)
5. Pyrometer (2x)
6. Lüftung
7. Massekontakt
8. Drucksensor und Drossel

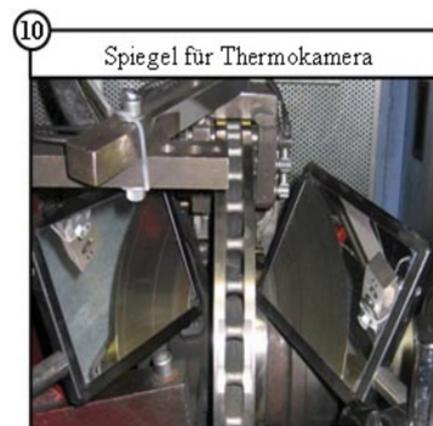
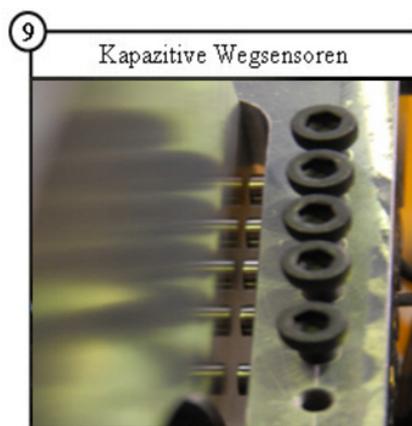
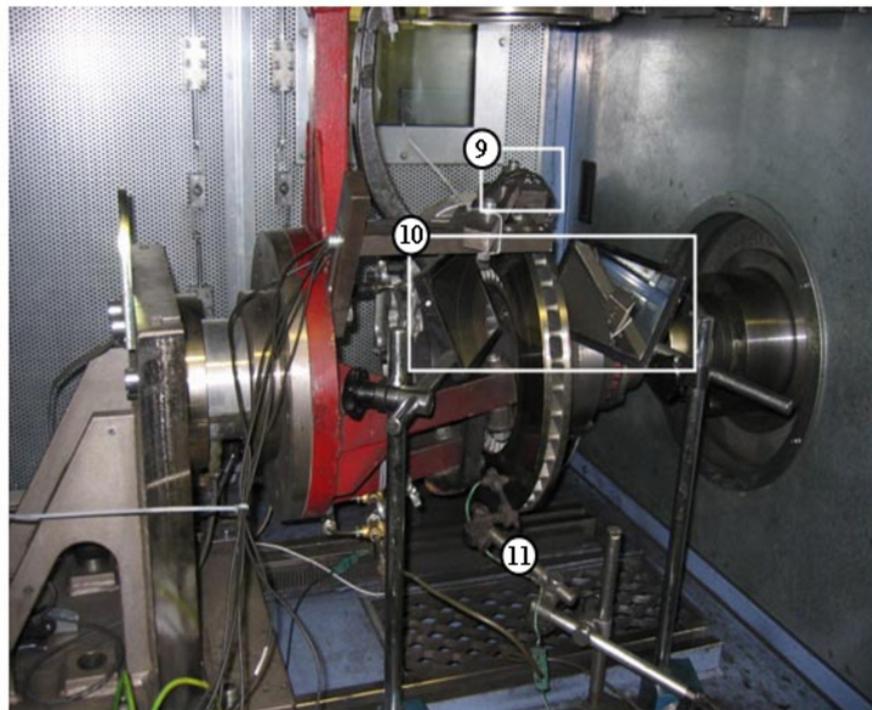


Abbildung 5.3: Messaufbau zur Bremsscheibentopografieerfassung und Temperaturmessung

9. Kapazitive Wegsensoren

10. Spiegel für Thermobildkamera

11. Thermoschleifelement

## 5.2 Messtechnik

Die zu erfassenden Messgrößen lassen sich im Wesentlichen aus den definierten Falsifikationsmethoden zu den Hypothesen ableiten. Von besonderer Bedeutung sind die Bestimmung der Temperaturverteilung auf den Bremscheibenreibflächen sowie die Erfassung der Topografie der Reibringe während des Bremsvorgangs.

Die Temperaturmessung erfolgt mittels einer Infrarot-Thermokamera, wodurch mit Hilfe von Spiegeln die Temperaturverteilung auf beiden Reibringen ermittelt werden kann. Die Temperatur wird geschwindigkeitsunabhängig an 256 Messstellen in Umfangsrichtung pro Umdrehung sowie an ca. 80 Positionen (in Abhängigkeit von der Positionierung der Kamera und Spiegelausrichtung) je Reibring in radialer Richtung gemessen. Eine schematische Darstellung des Aufbaus der Thermokamera zeigt die Abbildung 5.4.

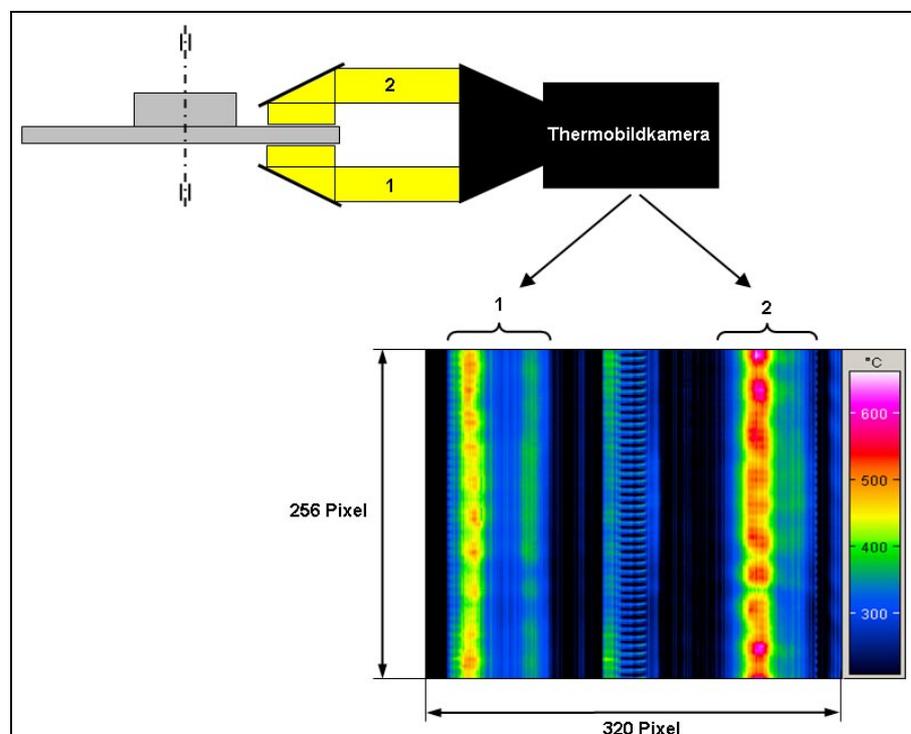


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Temperaturmessung

Die Topografiemessung an den Brems scheibenreibringen erfolgt durch den Einsatz von zehn kapazitiven Abstandssensoren, so dass die Topografie der Reibringe an jeweils fünf unterschiedlichen radialen Positionen erfasst wird. Darüber hinaus erfolgt u.a. die Messung des Bremsdruckes und des Bremsmomentes. Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 beinhalten eine Zusammenfassung der bei den Bremsversuchen gemessenen Größen sowie die Daten der eingesetzten Messsysteme bzw. Sensorik.

Tabelle 5.1: Erfasste Messdaten

Messgröße	Messmittel	Abtastfrequenz
Thermobilder Faustseite	Infratec Varioscan	256 pro Umdrehung
Thermobilder Kolbenseite	Infratec Varioscan	256 pro Umdrehung
Oberfläche Faustseite	5 kapazitive Wegsensoren	10 kHz
Oberfläche Kolbenseite	5 kapazitive Wegsensoren	10 kHz
Bremsmoment (BTV)	Momentenmesswelle Prüfstand	10 kHz
Bremsdruck am Sattel (BPV)	Drucksensor am Sattel	10 kHz
Scheibentemperatur	Thermoschleifelement	k.A.
Scheibentemperatur Faustseite	Pyrometer 1	10 kHz
Scheibentemperatur Kolbensei-	Pyrometer 2	10 kHz
Scheibennullpunkt	Induktiver Nullpunktgeber	1 Impuls pro Umdrehung

Tabelle 5.2: Sensordaten der Hauptmessgrößen

Messmittel	Typbezeichnung	Auflösung	Messbereich
Thermobildkamera	Jade III MWIR	20 mK bei 25 °C	-40 bis 900 °C
Kapazitive Wegsensoren	Mico Epsilon CapaNC DT S600-2	statisch: 0,08 µm	2 mm
		dynamisch: 0,4 µm	
Drucksensor	HBM P3MB	NA	NA
Momentenmesswelle	GIF-Messflansch (40) SO 733	NA	NA

### 5.3 Untersuchtes Bremssystem

Das bei den Hauptuntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Bremssystem wurde für ein Fahrzeug entwickelt, das eine Gesamtmasse (beladen) von 2800 kg und eine Motorleistung von 260 kW übersteigt. Im folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften der Radbremsenkomponenten genannt.

**Bremssattel:** Zweikolben Faustrahmensattel mit Rahmen aus einer Aluminium-Legierung.

**Bremssattel:** Bremsenkennwert (C\*):.....0,8  
Belaghöhe (ca.):.....75 mm  
Belagbogenlänge:.....46 °  
Belagfläche (ca.):.....100 mm<sup>2</sup>

**Bremsscheibe:** Scheibentyp:.....belüftet  
Anzahl der Kühlkanäle:.....40  
Effektiver Radius (ca.):.....160 mm  
Bremsscheibenmasse (ca.):.....16,6 kg  
Bremsscheibentopfmasse (ca.):.....0,8 kg

## 5.4 Durchgeführte Versuche

Die experimentellen Untersuchungen am Schwungmassenprüfstand erfolgten beim Einsatz von serienrepräsentativen Bremskomponenten und unter Versuchsbedingungen, die gemäß den durch die Literatur gelieferten Erkenntnissen das Auftreten von Hotspots begünstigen (niedrige Bremsdrücke, hohe Geschwindigkeiten, hohe Bremsbelagsteifigkeit). Neben Stoppbremsungen mit konstantem Bremsdruck wurden Schleppbremsungen (Bremsungen mit konstanter Geschwindigkeit und konstantem Bremsmoment) durchgeführt. Zur Bewertung der Reproduzierbarkeit wurden die einzelnen Versuche mit jeweils drei (neuen) Bremsscheiben/Bremssbelägen-Paarungen wiederholt. Angelehnt an die übliche Vorgehensweise bei Standarduntersuchungen der Bremsentwicklung wurden vor Beginn der jeweiligen Versuchsserien neue Bremsscheiben und Bremsbeläge grundsätzlich einem Einlaufprogramm unterzogen. Je nach Untersuchungszweck wurde außerdem ein so genanntes Recovery-Programm angewendet. Ein Überblick der wichtigsten durchgeführten Versuche gibt Tabelle 5.3 wieder. Die darin angegebene Anzahl der Versuche bezieht sich auf die jeweils mit neuen Bremsscheiben/Bremssbelägen durchgeführten Folgebremungen. Durch gleichzeitige Variation von Bremsmoment und Geschwindigkeit wurde die Bremsleistung konstant gehalten.

Tabelle 5.3: Zusammenfassung der durchgeführten Versuche

Art der Bremsung	Anzahl	$v_{start}$ [km/h]	$v_{end}$ [km/h]	P [bar]	M [Nm]	$T_0$ [°C]
Einlauf	60	80	30	30	-	100
Recovery	60	80	30	30	-	100
Stoppbremsung	6	240	80	10	-	100
Stoppbremsung	6	210	80	-	310	70
Stoppbremsung	6	210	80	-	420	70
Stoppbremsung	6	210	80	-	530	70
Schleppbremsung	6	160	160	-	310	90
Schleppbremsung	6	140	140	-	354	90
Schleppbremsung	6	200	200	-	248	90

Es erfolgten außerdem Variationen von Eigenschaften des Bremsbelags (Belagdicke sowie –bogenlänge), worauf im Kapitel 6 eingegangen wird.

## 5.5 Versuchsauswertung

Der Synchronisierung, Gegenüberstellung und Verarbeitung der Messdaten diene ein eigens entwickeltes, Matlab-basiertes Auswertungsprogramm. Temperatur- und Topografiedaten können somit bei allen erfassten radialen Positionen für jede einzelne Umdrehung während des Bremsvorgangs ausgewertet und dargestellt werden. Bremsdruck- und Bremsmomentverläufe sind ebenfalls integriert und werden mit den weiteren Messdaten synchronisiert. Sämtliche Daten können mittels Fourier-Transformation im Frequenzbereich analysiert werden. Darüber hinaus liefern dreidimensionale Darstellungen Übersichten über Temperaturverteilung bzw. Topografie der gesamten Bremsscheibenoberflächen zu beliebigen Zeitpunkten während der Bremsung. Abbildung 5.5 zeigt die graphische Bedienoberfläche des Auswertungsprogramms.

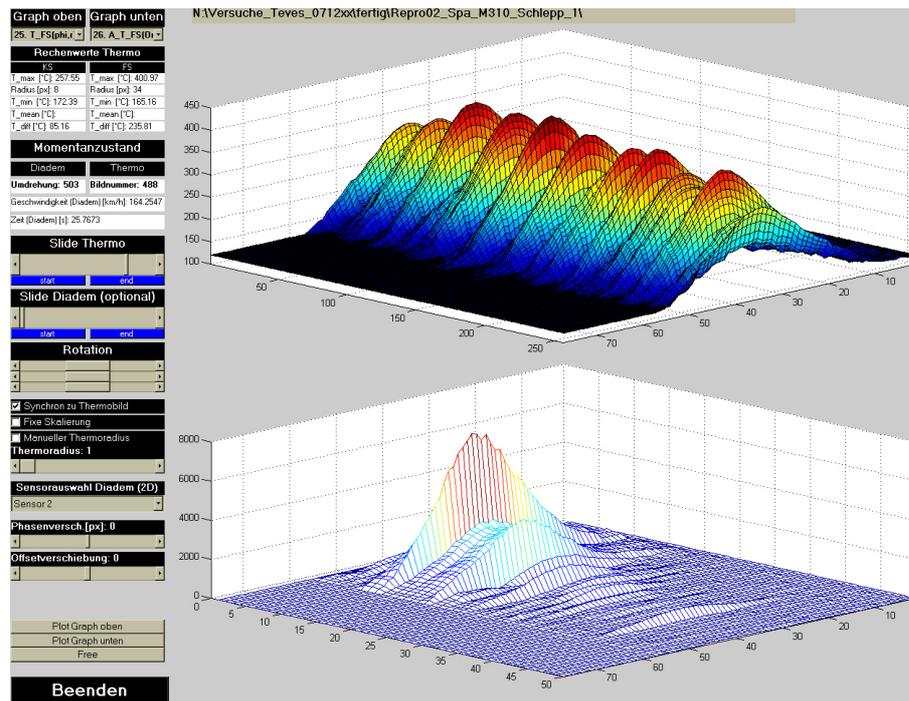


Abbildung 5.5: Bedienoberfläche des Auswertungsprogramms

### 5.5.1 Hotspotdefinition

Die ausgewertete Literatur liefert keine allgemein anerkannte Klassifizierung von Hotspots. Anderson und Knapp<sup>78</sup> schlagen Definitionen für verschiedene Hotspotarten vor und beschreiben diese anhand ihrer Größe, Absoluttemperatur bzw. Temperaturunterschiede zu umliegenden Bereichen und Zeitspanne des Vorkommens der Hotspots, wie in Tabelle 5.4 dargestellt. Die nach diesen Definitionen genannten „Focal“-Hotspots (Größe 5-20 mm) bzw. „Distortional“-Hotspots treffen am ehesten auf die in Verbindung mit Heißrubbeln üblicherweise beschriebenen Hotspots zu. Zu „Focal“-Hotspots fehlen jedoch Angaben zu Temperaturunterschieden im Bezug auf die umliegenden Bereiche. „Distortional“-Hotspots werden definiert als Temperaturerhöhungen von bis zu 100 - 700 °C. Diese Klassifizierung eignet sich jedoch nicht zur Bestimmung einer unteren Grenze, ab der Hotspots in Verbindung mit der Frage des Entstehungsmechanismus als solche definiert werden können.

<sup>78</sup> Anderson: Hot Spotting in Automotive Friction Systems, 1990, S. 320

Tabelle 5.4: Hotspotklassifizierung nach Anderson und Knapp<sup>79</sup>

Type	Width (mm)	Temperature (°C)	Duration
Asperity	<1	To 1200 peak	<1 ms <sup>a</sup>
Focal	5 - 20	750 - 1200 peak	0.5 - 20 s
Distortional	20 - 100	100 - 700 delta T	>10 s
Regional	50 - 200	10 - 100 delta T	>10 s

<sup>a</sup>For cast iron only; lining asperities may have much longer contact times.

In Anlehnung an die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gegebenen messtechnischen Möglichkeiten wird als Hotspot eine lokale Temperaturerhöhung innerhalb der typischen Wellenlänge von Hotspots (ein Sechstel bis einem Zwanzigstel des Brems Scheibenumfangs) von mindestens 2°C definiert.

Zur Einschätzung der damit verbundenen thermischen Ausdehnung in axialer Richtung (aus der Ebene heraus) dient folgende vereinfachte Überlegung: Unter der Annahme, die Ausdehnung des Bereichs erhöhter Temperatur werde nicht durch die Verbindung zu umliegenden Bereichen verhindert und es gebe relativ zu umliegenden Bereichen keinen Temperaturabfall unterhalb der Oberflächen, lässt sich für die definierten 2°C aus der Beziehung

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l \quad (5.1)$$

mit  $\alpha \approx 10^{-5}$  1/K eine thermische Ausdehnung von lediglich 20 nm pro Millimeter „Hotspottiefe“ errechnen. Da jedoch die getroffenen Annahmen in der Realität nicht zutreffen, stellt obige Überlegung eine Grenzwertbetrachtung dar und in der Praxis sind zwangsläufig noch niedrigere Werte zu erwarten. Auch in Umfangsrichtung sind thermisch bedingte Verformungen in gleicher Größenordnung zu erwarten.

### 5.5.2 Drehzahl und Geschwindigkeit

Zur besseren Veranschaulichung wird im Folgenden unter Einbeziehung des dynamischen Reifenradius des betreffenden Fahrzeugs der Begriff „Geschwindigkeit“ anstatt „Drehzahl“ verwendet. Der Umrechnungsfaktor beträgt bei einem dynamischen Reifenradius von 0,36 m:

$$1 \text{ U/s} = 8,1 \text{ km/h}$$

<sup>79</sup> Anderson: Hot Spotting in Automotive Friction Systems, 1990, S. 320

## 5.6 Validation des Messverfahrens

Die ausreichend genaue und zuverlässige Bestimmung der Temperaturverteilungen auf den Reibringoberflächen sowie der Bremsscheibentopografie während des Bremsvorgangs stellt eine unabdingbare Bedingung zur Überprüfung der formulierten Hypothesen dar. Im diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von Vorversuchen zur Validierung der Messdaten aus dem System zur Bremsscheibentopografieerfassung sowie der eingesetzten Thermokamera vorgestellt.

### 5.6.1 Messung der Bremsscheibentopografie

Abbildung 5.6 zeigt die Verläufe der mit einem der kapazitiven Abstandssensoren erfassten Bremsscheibentopografie für drei aufeinanderfolgende Umdrehungen. Die Messung erfolgte bei unbetätigter Bremse mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h (20 Umdrehungen pro Sekunde). Aus dem zugehörigen Amplitudenspektrum (Abbildung 5.7) ist zu entnehmen, dass die Abweichungen für die meisten Ordnungen deutlich unter  $1\mu\text{m}$  betragen. Die erste Ordnung (Scheibenschlag,  $62\mu\text{m}$ ) ist wie auch in den weiteren Abbildungen zur besseren Lesbarkeit der Amplitudenspektren zu Bremsscheibentopografie nicht dargestellt.

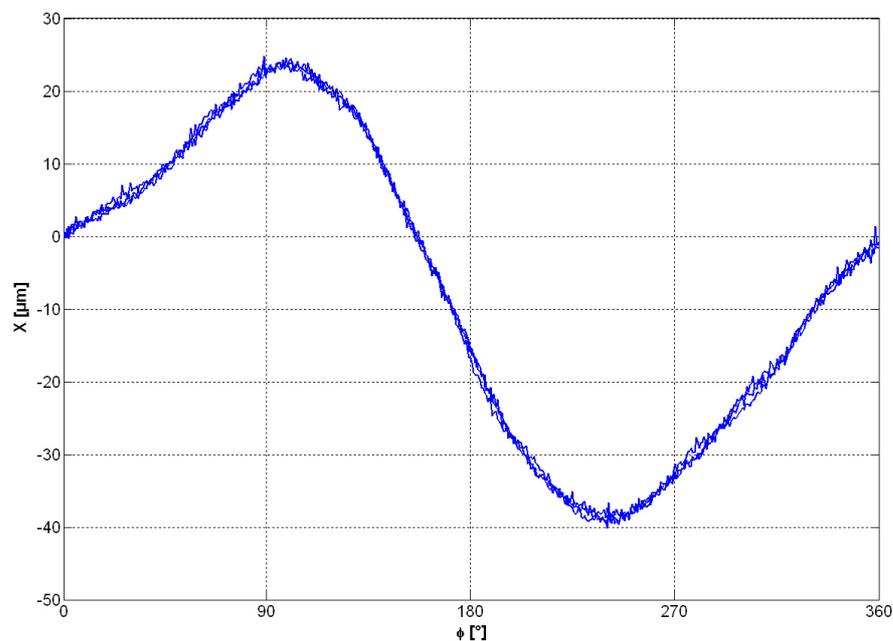


Abbildung 5.6: Gemessene Bremsscheibentopografie bei drei aufeinanderfolgende Umdrehungen

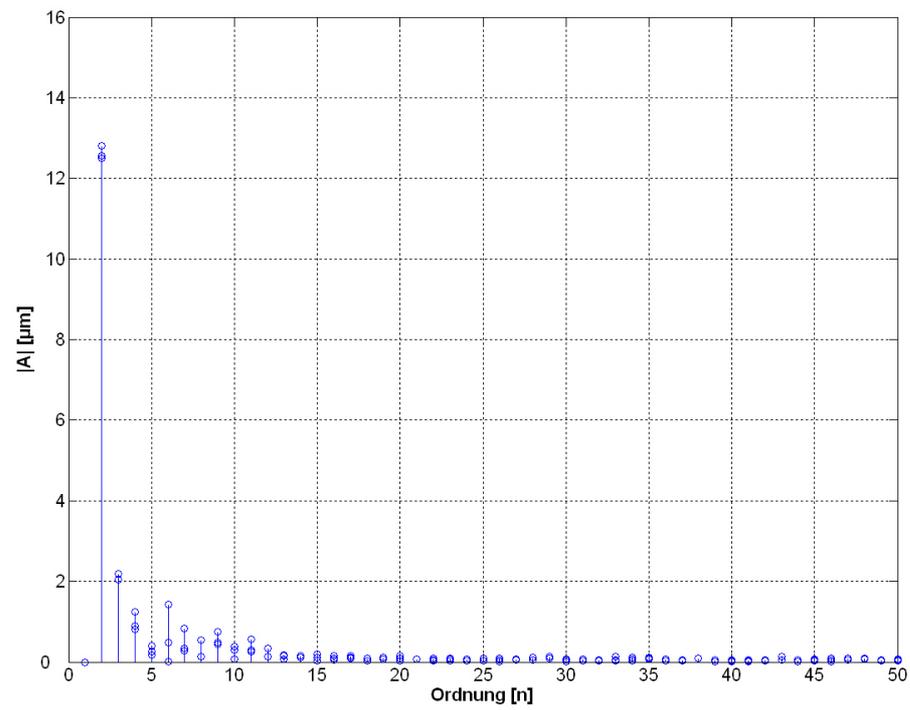


Abbildung 5.7: Amplitudenspektrum der gemessenen Bremscheibentopografie für drei aufeinanderfolgende Umdrehungen

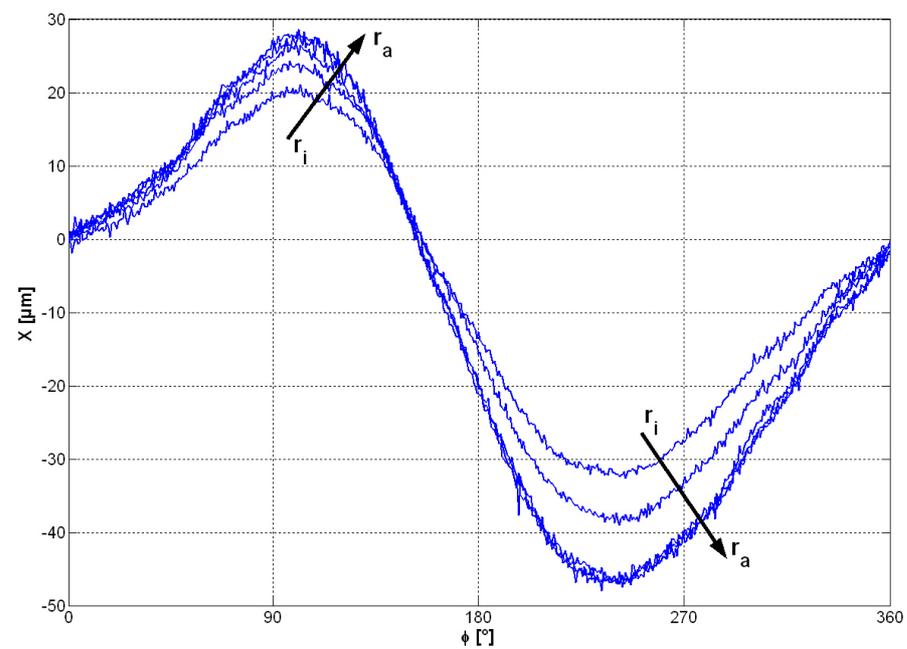


Abbildung 5.8: Signale der fünf Abstandssensoren für eine Umdrehung.

Abbildung 5.8 zeigt die gemessene Oberflächentopografie eines Bremscheibenreibrings an den fünf radialen Positionen der Abstandssensoren für eine Bremscheibenumdrehung ebenfalls bei unbetätigter Bremse und einer Geschwindigkeit von 160 km/h. Ersichtlich ist dabei die Zunahme der Amplitude der gemessenen Auslenkungen mit wachsenden Radien, wodurch der Einfluss des Bremscheibenschlags verdeutlicht wird.

### 5.6.2 Temperaturmessung

Mit der eingesetzten Infrarot-Thermobildkamera wird die Temperatur auf den Reibringoberflächen jeweils an ca. 80 Positionen in radialer Richtung (abhängig von der Spiegelausrichtung) sowie an 256 Positionen je Umdrehung in Umfangsrichtung (drehzahlunabhängig) erfasst, so dass die Temperatur an über 20.000 Stellen je Reibring und Umdrehung gemessen wird. Durch entsprechende Datenverarbeitung ist dadurch unter anderem eine dreidimensionale Visualisierung der Temperaturverteilung auf den Bremscheibenoberflächen möglich, wie in der Abbildung 5.9 dargestellt.

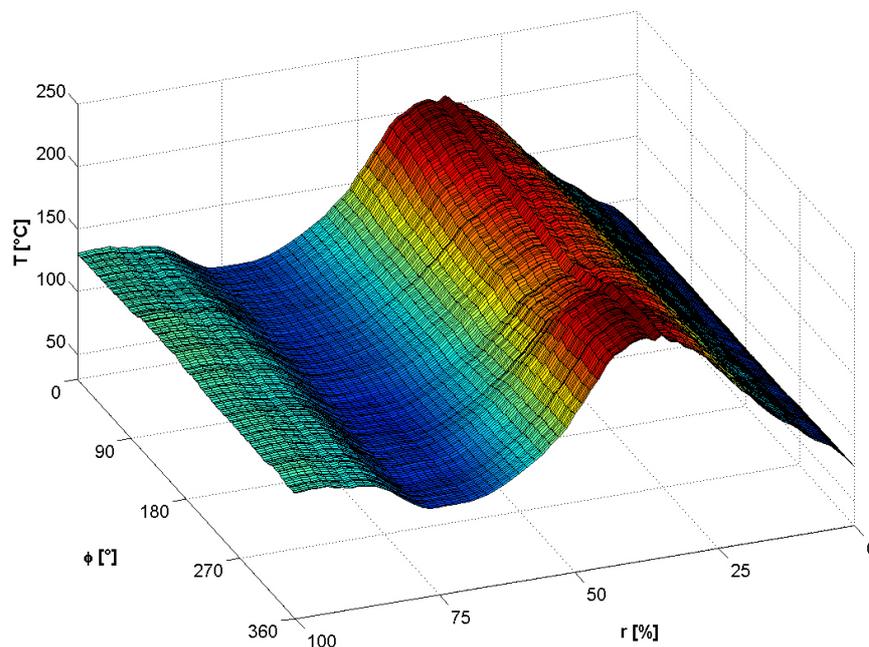


Abbildung 5.9: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung

Darüber hinaus sind zweidimensionale Darstellungen von Temperaturverläufen in Umfangsrichtung für beliebige Radien möglich. Abbildung 5.10 zeigt die Temperaturverläufe für drei aufeinander folgende Umdrehungen bei betätigter Bremse ca. 10 s nach

Beginn des Bremsvorgangs ( $M=310\text{ Nm}$ ,  $v=160\text{ km/h}$ ), wobei mit steigender Umdrehungszahl ein Temperaturzuwachs erkennbar wird.

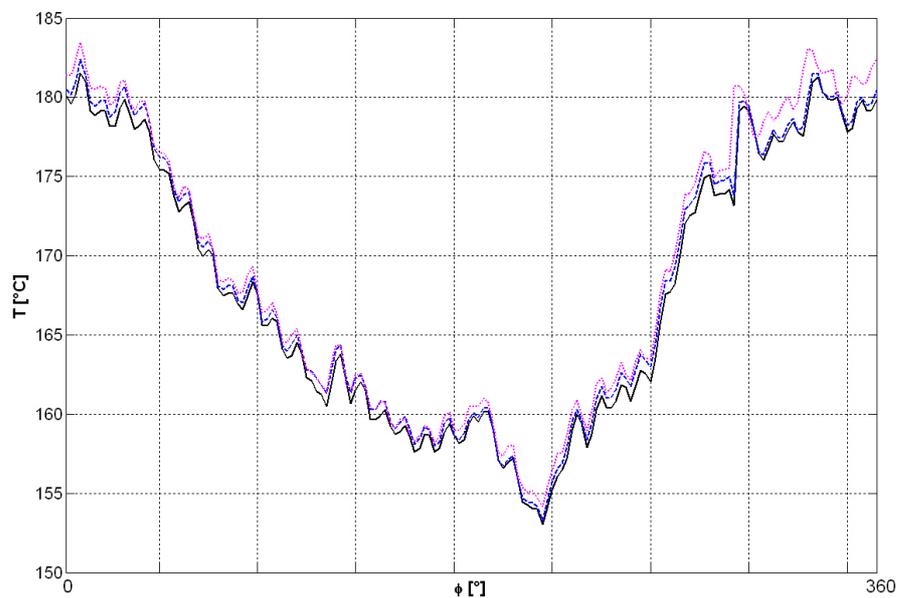


Abbildung 5.10: Temperatur in Umfangsrichtung für drei aufeinanderfolgende Umdrehungen einer Bremsung (im mittleren Bereich des Reibrings)

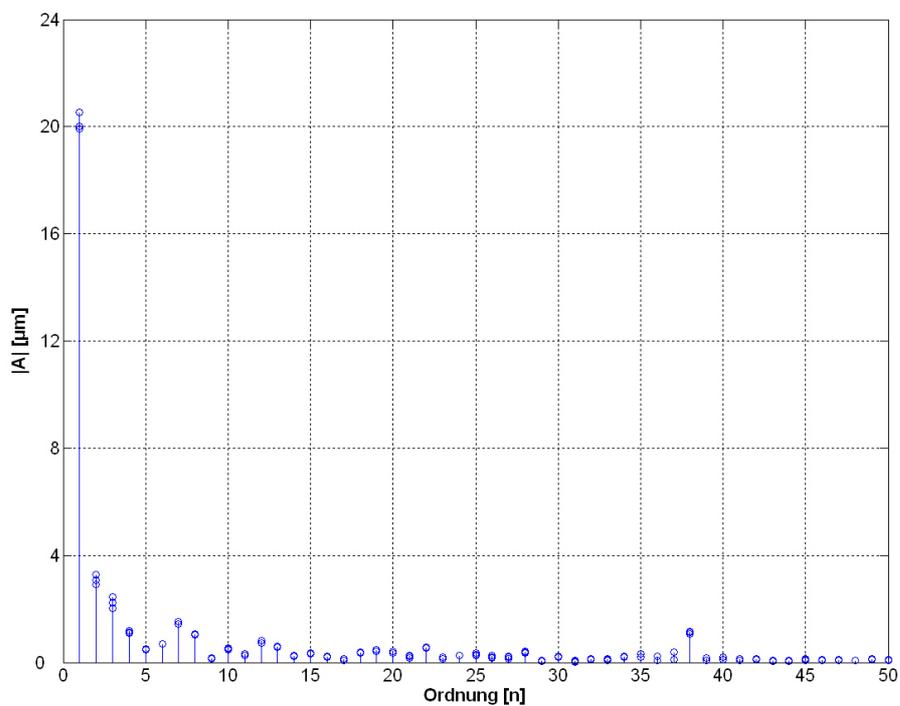


Abbildung 5.11: Amplitudenspektrum der Temperatur für drei aufeinanderfolgende Bremsungen

Abbildung 5.11 zeigt für die gleichen Umdrehungen das Amplitudenspektrum der Temperaturschwankungen. Die mittlere Temperatur beträgt für den betrachteten Radius 173 °C.

Bei hohen Temperaturen und ausgebildeten Hotspots werden nur geringe zeitliche Temperaturänderungen auf der Bremsscheibenoberfläche festgestellt. Abbildung 5.12 zeigt die Temperaturverläufe im Radius der größten Temperaturschwankungen für drei aufeinanderfolgende Umdrehungen. Eine Differenzbetrachtung der Verläufe zeigte, dass Temperaturvariationen von max. 2 °C beim Vergleich der aufeinanderfolgenden Umdrehungen vorhanden sind.

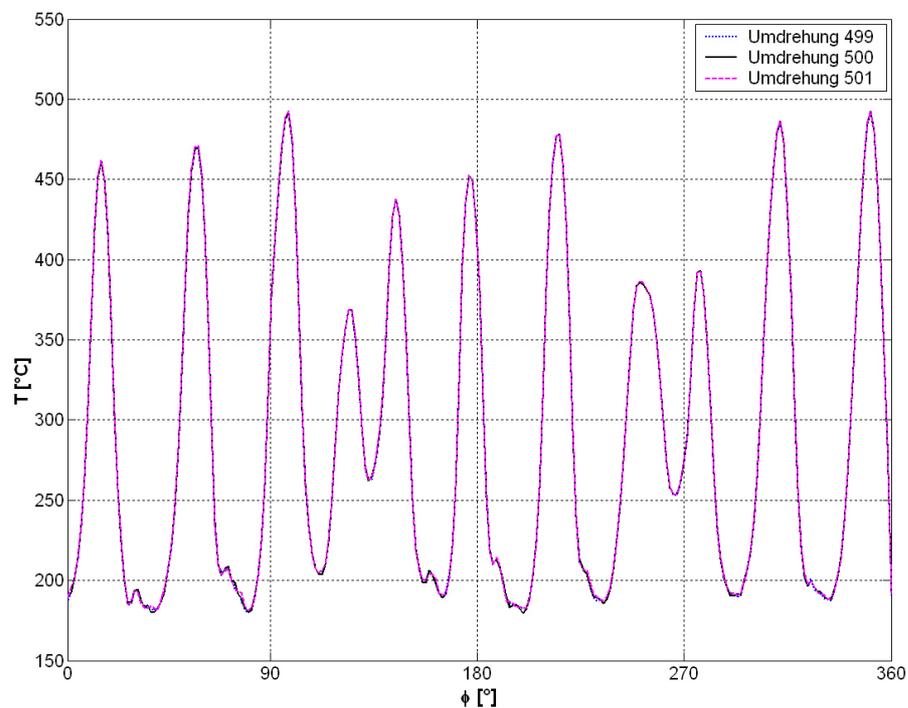


Abbildung 5.12: Bremsscheibentemperatur für drei aufeinanderfolgende Umdrehungen bei ausgebildeten Hotspots

Prinzipbedingt hängt die angezeigte Temperatur der Thermokamera von der eingestellten Emissivitätszahl ab. Der eingestellte Wert wurde mittels Kalibrierungsmessungen für Grauguß-Bremsscheiben bestimmt und wurde bei allen Untersuchungen konstant gehalten. Daraus resultierende, geringe Abweichungen bei der Bestimmung der Absoluttemperaturen sind bei Hotspotuntersuchungen von untergeordneter Bedeutung, da Temperaturschwankungen im Fokus der Untersuchung stehen.

Nach Hotspotbildung wurden jedoch häufig Bremsbelagablagerungen im Bereich der Hotspots beobachtet, die die Messung durch Schwankungen der Oberflächenemissivität hinsichtlich Relativtemperatur verfälschen können. Die Ablagerungen wurden durch Hochgeschwindigkeits-Folgebremungen entfernt, wobei im Falle von erneuter Hotspotbildung Ablagerungen an den entsprechenden Stellen entstanden.

Abbildung 5.13 zeigt zu Beginn der Bremsung höhere lokale Temperaturen in Umfangsrichtung an den Stellen von visuell wahrnehmbaren Belagablagerungen. Durch lange Abkühlphasen sind jedoch keine Temperaturschwankungen auf den Bremsscheibenoberflächen zu erwarten. Im weiteren Verlauf der Bremsung sind auf diesen Stellen Temperaturminima feststellbar, worauf im folgenden Kapitel eingegangen wird.

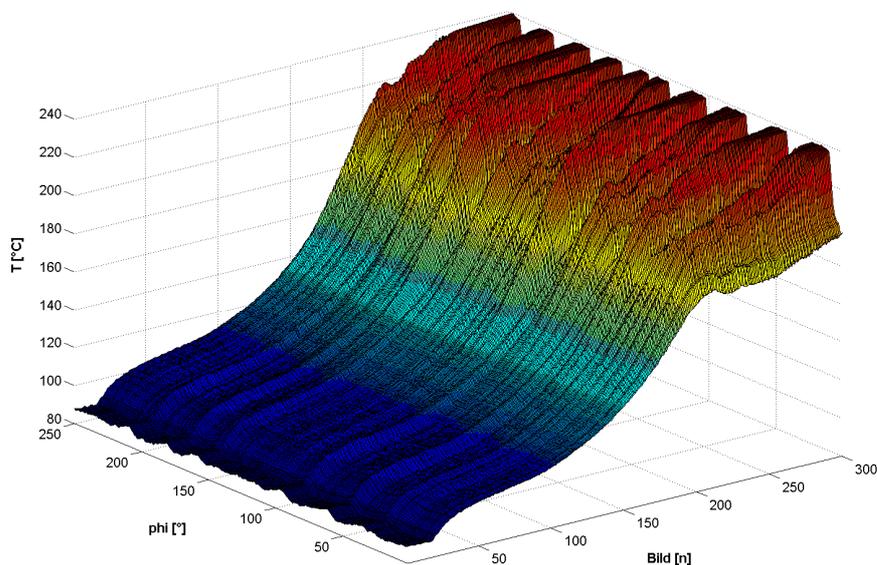


Abbildung 5.13: Temperaturverteilung in Umfangsrichtung für 300 Umdrehungen

## 6 Ergebnisse

Im diesem Kapitel werden die Hauptergebnisse der experimentellen Prüfstandversuche zur Untersuchung der Ausprägungsformen sowie des Entstehungsprozesses von Hotspots dargestellt. Es wird vorerst auf das grundsätzliche Erscheinungsbild von Hotspots während des Bremsvorgangs eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit des Auftretens von Hotspots bei Bremsungen mit verschiedenen Bremsscheiben und Bremsbelägen aus jeweils gleicher Produktionscharge und unter gleichen Randbedingungen dargelegt. Es folgt ferner eine Betrachtung des Hotspotbildungsverhaltens bei aufeinander folgenden Bremsbetätigungen unter gleichen Anfangsbedingungen.

Zur Überprüfung der aus den bekannten Modellvorstellungen hergeleiteten Hypothesen und zur Bestimmung der Ursachen-Wirkungs-Kette der Hotspotentstehung wurde zunächst der Effekt einer Variation der Bremsbelagbogenlänge auf die Hotspotbildung analysiert. Zur Beantwortung der Frage, ob der Hotspotentstehungsprozess durch einen Initial-Hotspot ausgelöst wird, folgte eine Analyse des Auftretens von Temperaturschwankungen in Umfangsrichtung der Bremsscheibe. Schließlich erfolgte die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Temperaturschwankungen und Bremsscheibenverformungen.

### 6.1 Erscheinungsbild von Hotspots

Die in der Abbildung 6.1 dargestellten Aufnahmen von einer Thermobildkamera stammen aus orientierenden Versuchen mit dem Bremssystem eines Pkws der oberen Mittelklasse und zeigen die charakteristische Erscheinungsform von Hotspots auf den Bremsscheibenoberflächen. Die Anfangsgeschwindigkeit betrug 200 km/h und der Bremsdruck 10 bar. Das obere Bild zeigt die Temperaturverteilung ca. zwei Sekunden nach Bremsdruckaufbau, wobei die Kolbenseite (die bezogen auf das Fahrzeug innere Bremsscheibenseite) links und die Faustseite (respektive äußere Seite) rechts dargestellt ist. Auf der Kolbenseite bilden sich zwei so genannte Hotbands (Temperaturschwankungen in radialer Richtung) in innere und äußere Radien, während auf der Faustseite ein in radialer Richtung annähernd mittig angeordneter Hotband zu erkennen ist. Auf der Faustseite können außerdem innerhalb des Hotbands Temperaturschwankungen ansatzweise angedeutet werden, so dass etwa zu diesem Zeitpunkt die Hotspotbildung bereits begonnen hat.

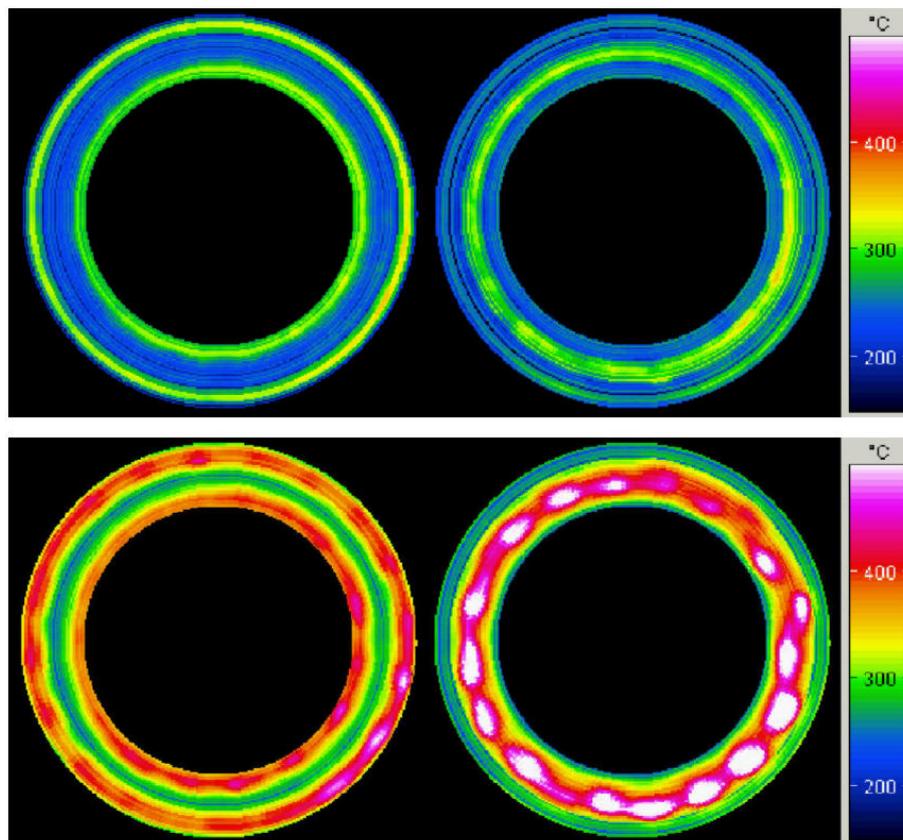


Abbildung 6.1: Thermoaufnahmen der Bremsscheibenreibflächen 2 s (oben) und 15s (unten) nach Bremsdruckaufbau

Das untere Bild in Abbildung 6.1 zeigt die Temperaturverteilung nach ca. 15 Sekunden. Zu erkennen ist, dass sich jeweils auf den Hotbands auf der Faustseite ein Hotspottring mit deutlich ausgeprägten Hotspots und entsprechend auf der Kolbenseite zwei Hotspotringe bildeten, die jedoch geringere Temperaturunterschiede zu den umgebenden Bereichen aufweisen. Zwar ermöglicht die visuelle Betrachtung der Thermobilder eine schnelle Übersicht über die Temperaturverteilung auf den Reibflächen der Bremsscheibe, jedoch werden zugleich die Einschränkungen der visuellen Auswertung deutlich: Der genaue Zeitpunkt des Beginns der Hotspotentstehung kann mit diesem Verfahren nicht bestimmt werden. Darüber hinaus lässt sich die Hotspotanzahl nur schätzen, da trotz der annähernden Äquidistanz der Hotspots deutlich unterschiedliche Spitzentemperaturen vorhanden sind. Zur Objektivierung von Aussagen bezüglich des Auftretens von Hotspots ergibt sich deshalb daraus die Notwendigkeit, die Messdaten zur Bremsscheibentemperatur zu erfassen und je nach Untersuchungsziel zu verarbeiten.

Für die Hauptuntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde das Bremssystem eines leistungsstarken SUVs (Sport Utility Vehicle) eingesetzt. Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse beziehen sich, falls nicht anderes angegeben, auf dieses Bremssystem bzw. dessen Komponenten.

In der Abbildung 6.2 sind die Temperaturverteilungen auf den Reibflächen der Brems Scheibe bei einer Schleppbremsung mit 160 km/h und einem Bremsmoment von 310 Nm ca. 30 Sekunden nach Bremsbeginn zu erkennen, wobei die Anfangstemperatur 100 °C betrug. Auch bei diesem Bremssystem bildeten sich in radialer Richtung mittig angeordnete Hotspots auf der Faustseite, während sich auf der Kolbenseite zwei Hotspotringe innen und außen entwickelten. Aus dieser Darstellung wird auch ersichtlich, dass bedeutende Temperaturschwankungen nicht nur in Umfangsrichtung entstehen, sondern auch in radialer Richtung unter den genannten Bedingungen über 300 °C betragen können.

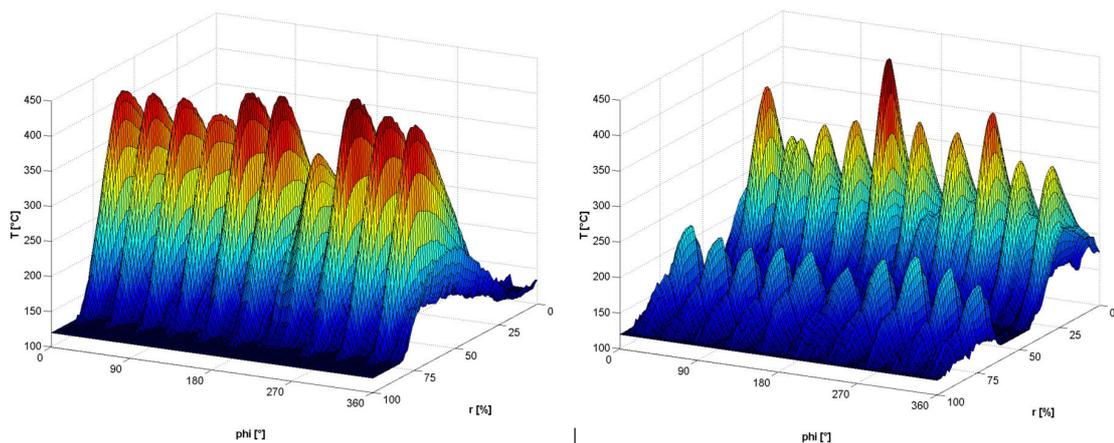


Abbildung 6.2: Temperaturverteilung auf Faust- (rechts) und Kolbenseite (links) der Brems Scheibe 30 Sekunden nach Bremsdruckaufbau

Die Amplitudenspektren der Temperaturschwankungen für Radien mit jeweils höchsten mittleren Temperaturen der Faust- und Kolbenseite sind in Abbildung 6.3 dargestellt. Die elfte Ordnung stellt sich auf beiden Seiten als dominant heraus, was auf die Bildung von elf Hotspots zurückzuführen ist. Die Amplitude der elften Ordnung der Temperaturschwankungen auf der Faustseite beträgt etwas über 200 °C und liegt somit deutlich über der in der gleichen Ordnung ermittelten Amplitude auf der Kolbenseite.

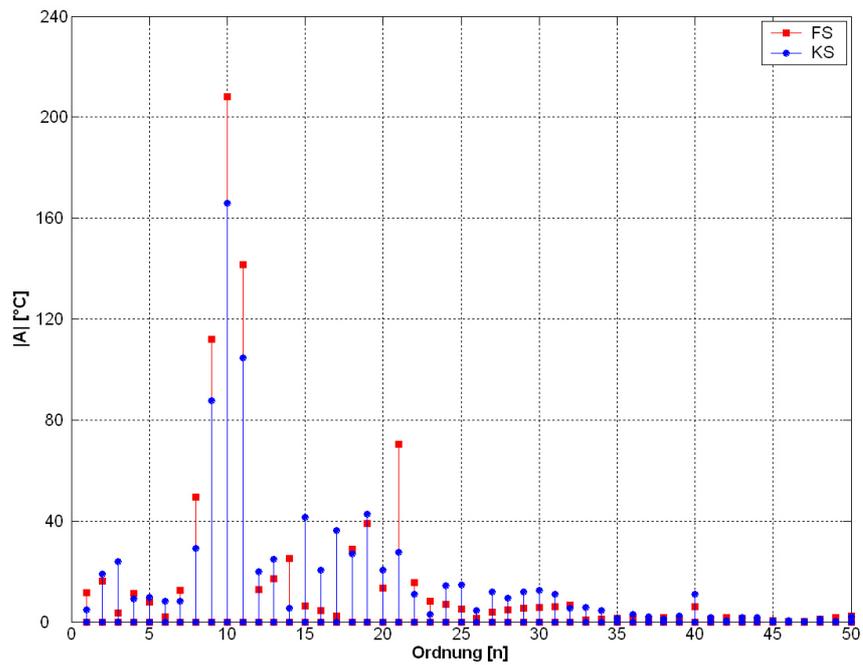


Abbildung 6.3: Amplitudenspektren der Temperaturschwankungen auf Faust- (rechts) und Kolbenseite (links) der Bremsscheibe 30 Sekunden nach Bremsdruckaufbau

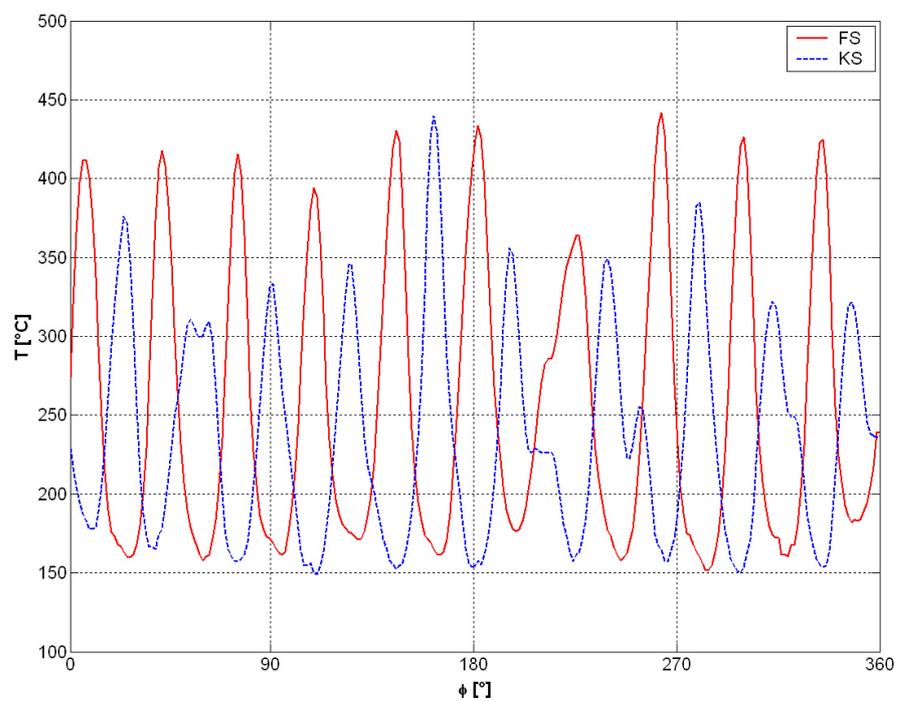


Abbildung 6.4: Gegenüberstellung der Temperaturverläufe von Faust- und Kolbenseite

Eine direkte Gegenüberstellung der Temperaturverläufe auf Faust- und Kolbenseiten zeigt Abbildung 6.4. Ersichtlich wird die Phasenverschiebung der Verläufe, die für die elfte Ordnung in diesem Fall  $173^\circ$  beträgt. Dies bedeutet, dass an den Stellen, an denen sich auf der einen Bremsscheibenseite Hotspots befinden, auf der gegenüberliegenden Seite Temperaturminima zu finden sind und umgekehrt.

Die Betrachtung der Bremsscheibentopografie zeigt, dass sich die Bremsscheibe bei ausgebildeten Hotspots wellenförmig verformt. Dabei ist die dominante Ordnung der auftretenden Welligkeit der der Temperaturschwankungen identisch, wie in der Abbildung 6.5 dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit ist dabei die erste Ordnung (Bremsscheibenschlag, ca.  $40\ \mu\text{m}$ ) nicht dargestellt. Der Vergleich zwischen den Welligkeitsamplituden für Zeitpunkte kurz nach Bremsbeginn (0,5 s) und bei ausgebildeten Hotspots (30 s) zeigt, dass sich die Welligkeiten der niedrigeren Ordnungen durch die thermische Belastung verstärkten, und stellen damit Anregungsquellen für Heißrubbeln mit den entsprechenden Frequenzen dar (40-60 Hz bei einer Raddrehzahl von 20 Umdrehungen pro Sekunde). Verformungen höherer Ordnung werden erst durch diese Belastung verursacht und können entsprechend Vibrationen von ca. 200 Hz hervorrufen.

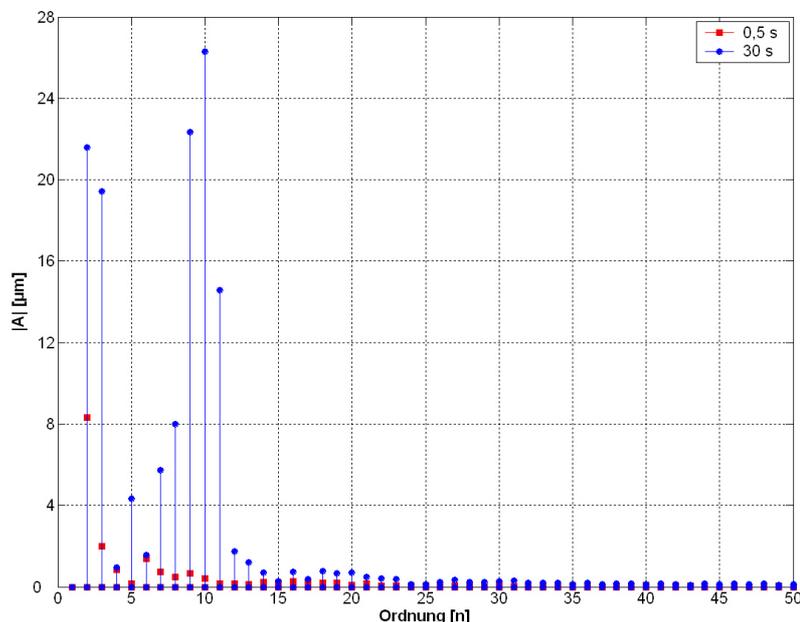


Abbildung 6.5: Amplitudenspektrum der Bremsscheibenverformung zu Zeitpunkten kurz nach Beginn der Bremsung und bei ausgebildeten Hotspots.

Die mit der ungleichmäßigen Temperaturverteilung in der Bremsscheibe gekoppelte Verformung ruft Bremsdruck- und Bremsmomentschwankungen (BPV bzw. BTV)

hervor. Abbildung 6.6 zeigt den Verlauf des Bremsdruckes 0,5 bzw. 30 Sekunden nach Bremsbetätigung.

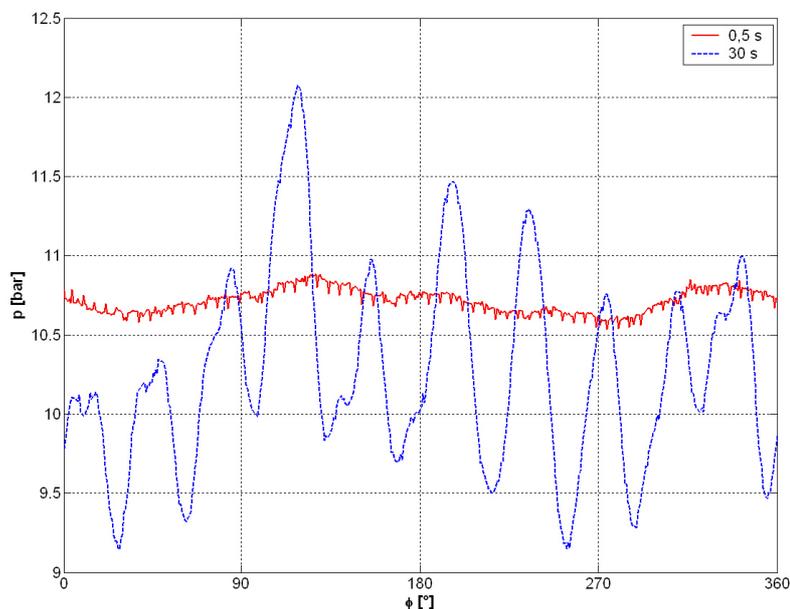


Abbildung 6.6: Gemessener Bremsdruck jeweils zu Zeitpunkten kurz nach Beginn der Bremsung bzw. bei ausgebildeten Hotspots.

Die Amplituden von Druck- und Momentschwankungen sowie deren dominante Ordnungen sind in Abbildung 6.7 bzw. Abbildung 6.8 dargestellt. Auch hier ist eine deutliche Zunahme der Schwankungen in den niedrigeren Ordnungen festzustellen, insbesondere bis zur fünften Ordnung. Bei den höherfrequenten Oszillationen dominiert kohärent zur Hotspotanzahl die zehnte Ordnung.

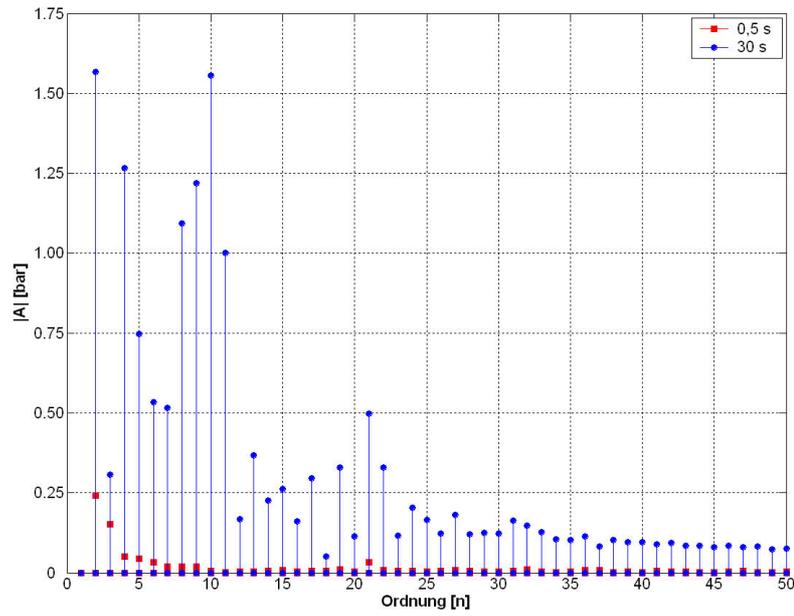


Abbildung 6.7: Amplitudenspektrum der Bremsdruckschwankungen zu Zeitpunkten kurz nach Beginn der Bremsung und bei ausgebildeten Hotspots.

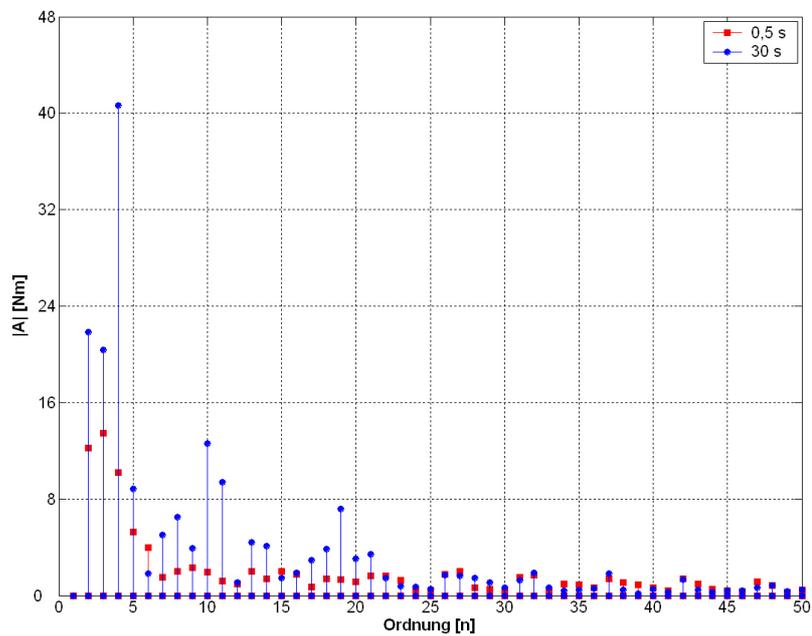


Abbildung 6.8: Amplitudenspektrum der Bremsmomentschwankungen zu Zeitpunkten kurz nach Beginn der Bremsung und bei ausgebildeten Hotspots.

## 6.2 Reproduzierbarkeit

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Hotspotbildung erfolgte die Durchführung von Bremsversuchen mit drei Brems scheiben aus derselben Produktionscharge mit jeweils neuen Bremsbelägen, ebenfalls aus einer Produktionscharge. Die Belagdicke wurde reduziert auf einen Wert kurz oberhalb der vom Hersteller definierten Verschleißgrenze. Nach einem Einlaufprogramm (60 Stoppbremsungen aus 80 km/h Anfangsgeschwindigkeit und 30 bar Bremsdruck) wurden Stoppbremsungen aus 210 km/h mit einem konstanten Bremsmoment von 310 Nm durchgeführt sowie mit auf den Brems scheibenoberflächen konstanter Ausgangstemperatur von 100 °C. Um den möglichen Einfluss einer Vorbelastung aus vorausgehender Hotspotbildung auszuschließen, wurde bei den neuen Scheiben jeweils die erste Stoppbremsung nach dem Einlaufprogramm ausgewertet.

Die daraus entstandenen Temperaturverteilungen sowie Brems scheibenverformungen auf der Faustseite bei einer Restgeschwindigkeit von 130 km/h sind in Abbildung 6.9 dargestellt. Daraus ist unmittelbar ersichtlich, dass es bei allen Bremsungen zur Hotspotbildung kam. Die Hotspots auf der Faustseite sind bezüglich der radialen Richtung etwa mittig auf dem Reibring zu finden, während auf der Kolbenseite (in der Abbildung nicht dargestellt) das im vorigen Abschnitt beschriebene Auftreten von zwei weniger ausgeprägten Hotspottringen auf inneren und äußeren Radien beobachtet wurde. Ebenfalls ersichtlich ist die mit den in Umfangsrichtung periodischen Temperaturschwankungen gekoppelte wellenförmige Brems scheibenverformung, die bei allen fünf erfassten Radien je Brems scheibenseite zu sehen ist. Die aus der dargestellten Perspektive konvexe Form der Brems scheibenoberfläche in radialer Richtung weist eine Amplitude von ca. 50 µm auf bei Winkelpositionen, die vom inneren zum äußeren Radius durch die Temperaturmaxima der Hotspots gehen. Bei den Stellen der Temperaturminima, also zwischen Hotspots, beträgt die Amplitude dieser Konvexität im Mittel ca. 30 µm. Darüber hinaus ist die Amplitude der Wellen im Radius der ausgeprägten Hotspots (also im radial mittleren Bereich) größer als in inneren bzw. äußeren Radien. Die Konvexität besteht also im Bereich der Hotspots aus einer Überlagerung der aufgrund von thermischen Spannungen erzwungenen Verformung und der an den Stellen erhöhter Temperatur zusätzlichen thermischen Ausdehnung in axialer Richtung (out of plane).

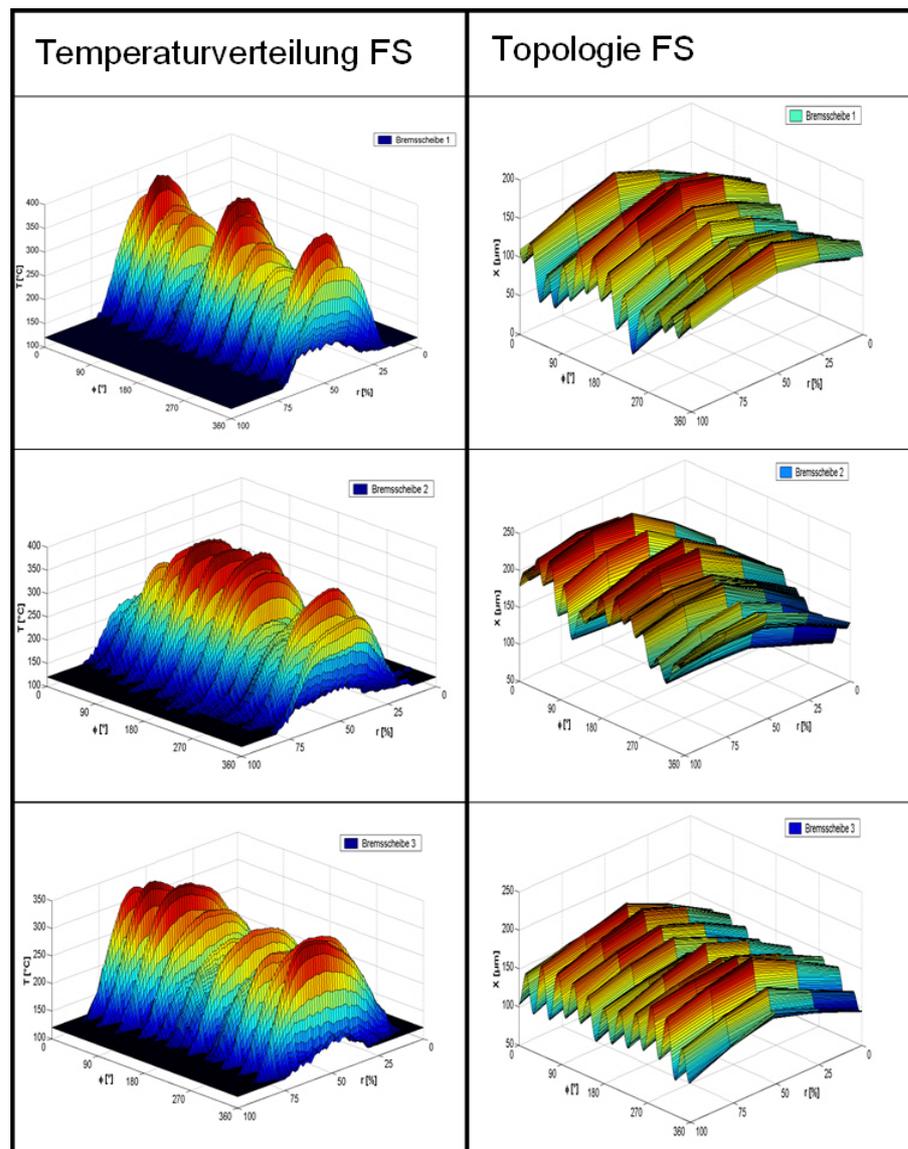


Abbildung 6.9: Temperaturverteilung und Bremscheibentopografie für drei verschiedene Bremscheiben und Belagpaarungen

Die Temperaturverläufe in Umfangsrichtung für Radien mit den jeweils größten Temperaturschwankungen der drei untersuchten Bremscheiben nach einer Bremszeit von 30 Sekunden sowie deren zugehörigen Amplitudenspektren sind in Abbildung 6.10 bzw. Abbildung 6.11 dargestellt. Bei allen Versuchen stellte sich die elfte Ordnung als dominant heraus, was der Bildung von elf Hotspots entspricht. Der mittlere Wert der Temperaturschwankungen in der elften Ordnung betrug  $142\text{ °C} \pm 6\text{ °C}$ . Der Einfluss der Kühlkanäle der Bremscheibe auf die Temperaturverteilung wird durch die leichte Erhöhung der Amplitude der 40. Ordnung (entsprechend der Kühlkanalanzahl) ersichtich.

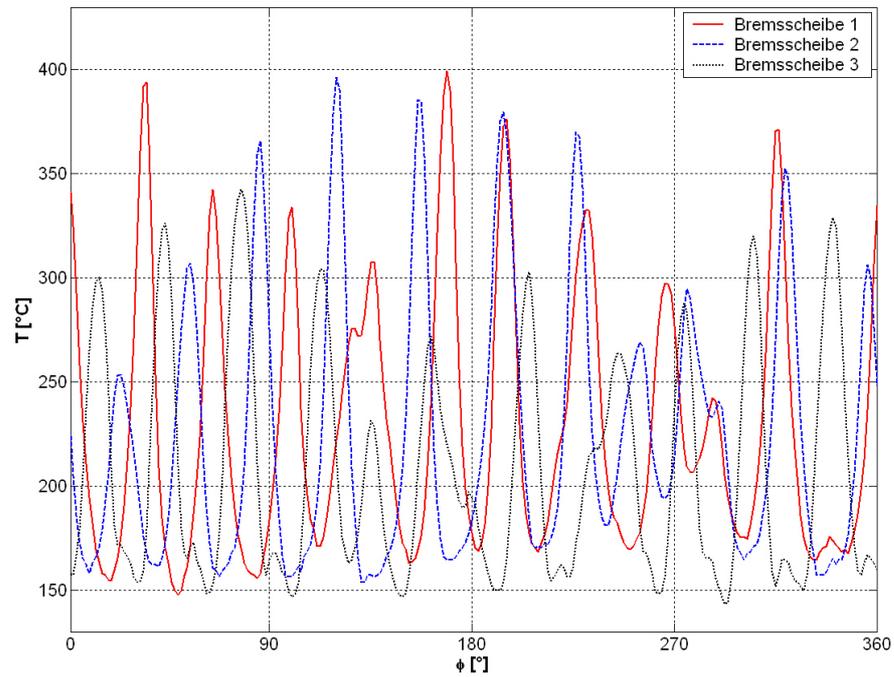


Abbildung 6.10: Verlauf der Temperatur im Bereich der Hotspots bei Bremsungen mit drei Bremsscheiben unter gleichen Versuchsbedingungen

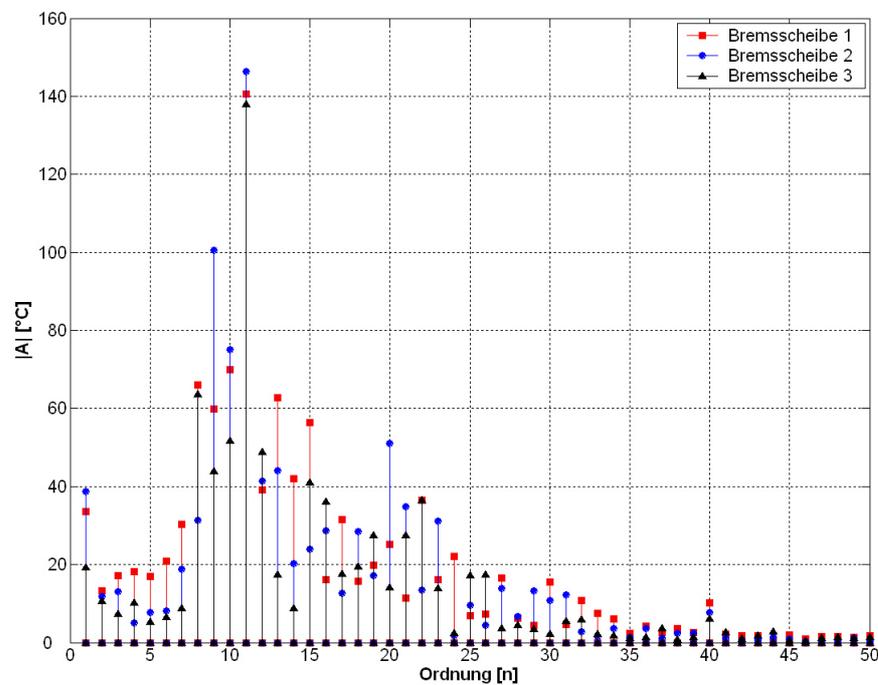


Abbildung 6.11: Amplitudenspektrum der Temperaturschwankungen im Bereich der Hotspots bei Bremsungen mit drei Bremsscheiben unter gleichen Versuchsbedingungen

Die Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13 zeigen die zugehörigen Bremsscheibentopografiemessungen bzw. deren Amplitudenspektren für die getesteten Bremsscheiben. Kohärent zu den Temperaturverläufen stellte sich auch für die Verformung die elfte Ordnung als dominant heraus. Die mittlere Amplitude der wellenförmigen Bremsscheibenverformung für die drei getesteten Scheiben betrug  $37 \mu\text{m}$  mit einer Abweichung von  $\text{ca. } \pm 3 \mu\text{m}$ .

Die Werte für die Phasenlage der Verformungssignale aus den fünf Sensoren je Bremsscheibenseite sind für die verschiedenen Radien zu der elften Ordnung innerhalb eines Bereiches von  $\pm 2^\circ$  zu finden, d.h. mit einer Übereinstimmung von  $(2/11)^\circ$  Scheibenwinkel. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die radialen Linien der Wellenberge bzw. Wellentäler zur Bremsscheibenmitte gerichtet sind.

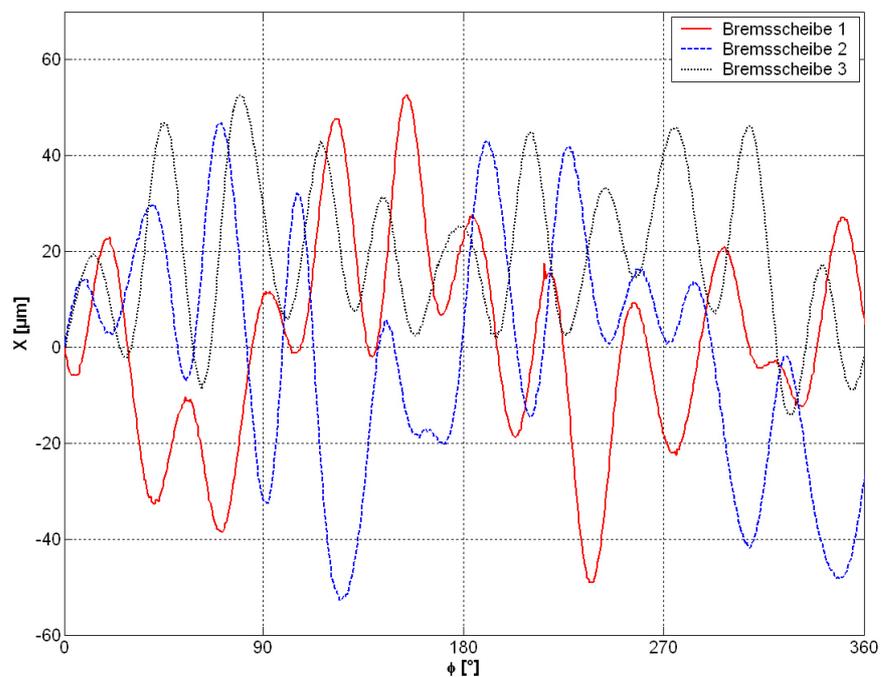


Abbildung 6.12: Gemessene Bremsscheibentopografie an drei Bremsscheiben bei ausgebildeten Hotspots

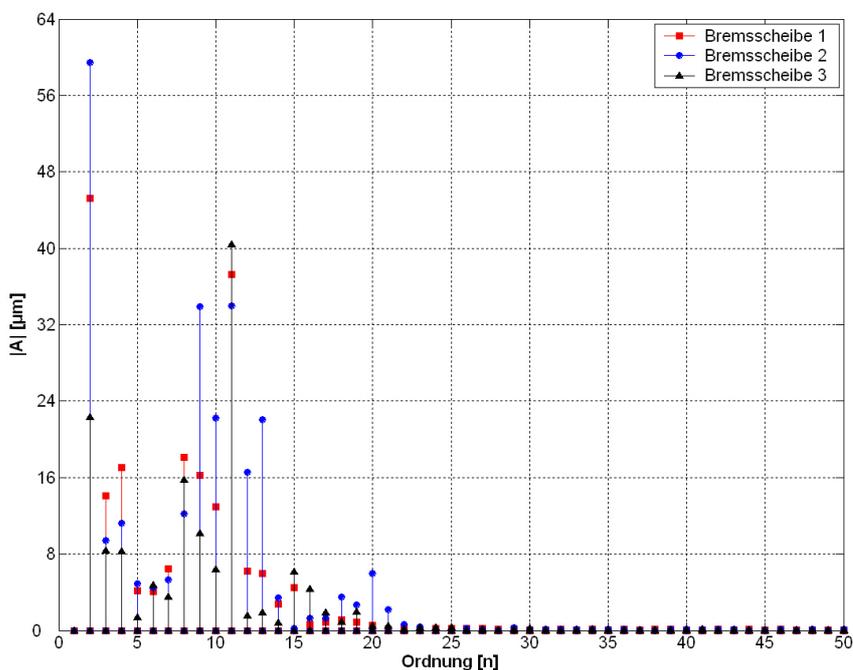


Abbildung 6.13: Amplitudenspektrum der Topografie welligkeit für drei getestete Bremscheiben

### 6.3 Folgebremungen

Zur Untersuchung des Hotspotbildungsverhaltens bei aufeinander folgenden Bremsungen wurden Versuchsreihen mit jeweils sechs Stoppbremsungen aus 210 km/h mit konstantem Bremsmoment (310 Nm) und jeweils gleicher Anfangstemperatur (70 °C) durchgeführt. Abbildung 6.14 zeigt die Temperaturverteilung auf den Bremscheibenreibflächen bei einer Restgeschwindigkeit von 140 km/h. Bei den einzelnen Bremsungen sind jeweils links die Kolbenseite und rechts die Faustseite dargestellt. Während sich bei der ersten Bremsung das bereits dargestellte Muster von einem mittigen Hotspotring auf der Faustseite und zwei weniger ausgeprägten Hotspotringen auf der Kolbenseite einstellte, kehrte sich dieses Verhältnis bei der zweiten Bremsung um. Bei der dritten Bremsung bildeten sich auf beiden Reibflächen jeweils zwei Hotspotringe. Ab der vierten Bremsung wiederholte sich dieser Zyklus.

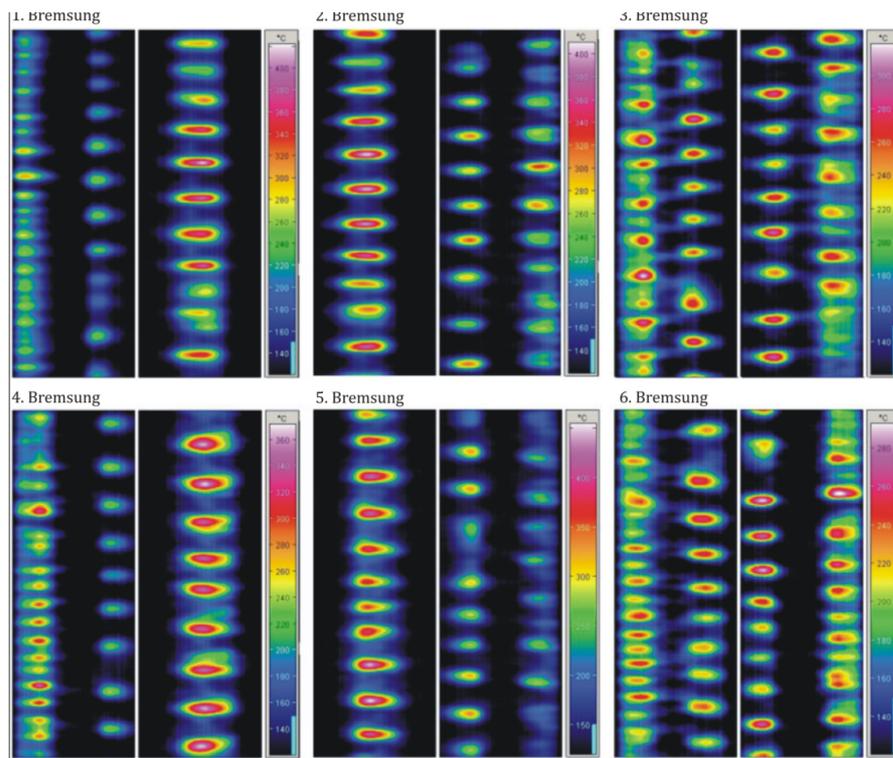


Abbildung 6.14: Temperaturverteilung auf den Reibringen der Bremsscheibe bei sechs aufeinander folgenden Bremsungen

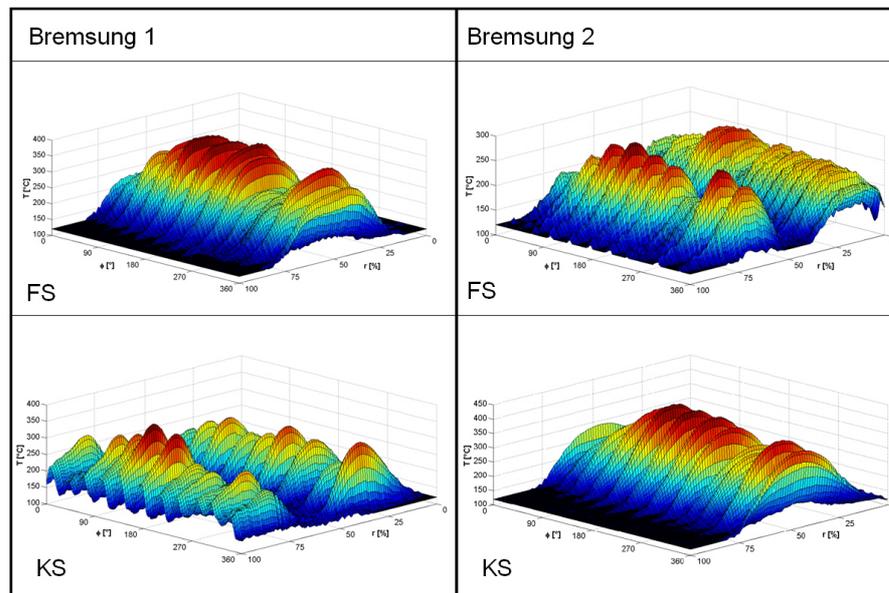


Abbildung 6.15: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilungen auf den Reibringoberflächen bei zwei aufeinander folgenden Bremsungen

An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass das in dieser Versuchsreihe bei der dritten bzw. sechsten Bremsung beobachtete Erscheinungsbild bei weiteren Versuchen selten aufgetreten ist. Am häufigsten erfolgte bei aufeinander folgenden Bremsungen eine reine Abwechslung zwischen den Erscheinungsmustern, die in den ersten beiden Bremsungen zu beobachten sind. Somit ergibt sich eine zyklische Alternierung der Positionen der Hotspotringe gemäß Abbildung 6.15.

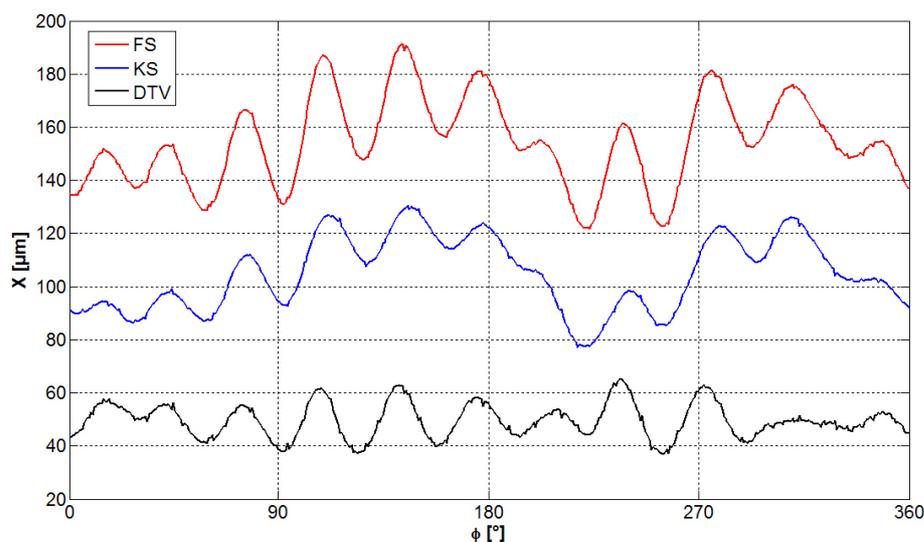


Abbildung 6.16: Dickenschwankungen aufgrund lokaler thermischer Ausdehnung durch die Hotspots

Als Grund für die festgestellte Alternierung wird die sich bei Folgebremungen aufgrund verstärkten Bremsbelagverschleißes im Bereich der Hotspotringe ergebende ungleichmäßige Flächenpressungsverteilung in radialer Richtung vermutet. Abbildung 6.16 zeigt die durch eine Sensorpaarung in einem mittigen Radius der Bremsscheibe gemessene Bremsscheibentopografie für Faust- und Kolbenseite sowie die daraus errechneten Scheibendickenschwankungen. Überlagert zu der für beide Seiten feststellbaren Welligkeit entstehen aufgrund der Hotspots zusätzlich lokale thermische Ausdehnungen auf den Wellenbergen der Faustseite, was sich in Form von Dickenschwankungen bemerkbar macht. Die Dickenschwankungen treten in der gleichen dominanten Ordnung wie die Scheibendeformationen auf (somit der Hotspotanzahl entsprechend) und weisen darüber hinaus eine annähernd gleiche Phasenlage auf. Da diese zusätzliche thermische Ausdehnung teilweise über 20  $\mu\text{m}$  beträgt und zusätzlich im Bereich des Hotspotringes deutlich höhere Temperaturen herrschen, wird ein in radialer Richtung ungleichmäßiger Bremsbelagverschleiß hervorgerufen. Im Falle eines mittigen Hotspotringes ist somit ein vom inneren zum äußeren Radius konkaves Bremsbelagverschleißbild zu erwarten, im Falle von zwei Hotspotringen in jeweils inneren und äußeren radia-

len Bereichen dagegen eine konvexe Form. Da der Brems Scheibenverschleiß deutlich geringer als der Belagverschleiß ist, findet keine vollständige Anpassung der Konturen der Reibpartner statt, so dass sich nach Abkühlung und erneuter Bremsbetätigung die genannten Inhomogenitäten der Flächenpressungsverteilung einstellen.

Wird jedoch zwischen den Hochgeschwindigkeitsbremsungen ein in der Bremsenerprobung zur Entfernung von Bremsbelagaufrag übliches, so genanntes „Recovery-Programm“ angewendet, also eine Folge von 10 Bremsungen von 80 auf 30 km/h mit einem Bremsdruck von 30 bar und Anfangstemperatur von 100 °C, wird der ungleichmäßige Bremsbelagverschleiß offensichtlich wieder aufgehoben, so dass die beschriebene Alternierung von Positionen der Hotspotringe zwischen den Brems Scheibenseiten nicht mehr stattfindet. Stattdessen entsteht dann der zentrale Hotspotring beim eingesetzten Bremssystem grundsätzlich auf der Faustseite, wie in der Abbildung 6.17 dargestellt.

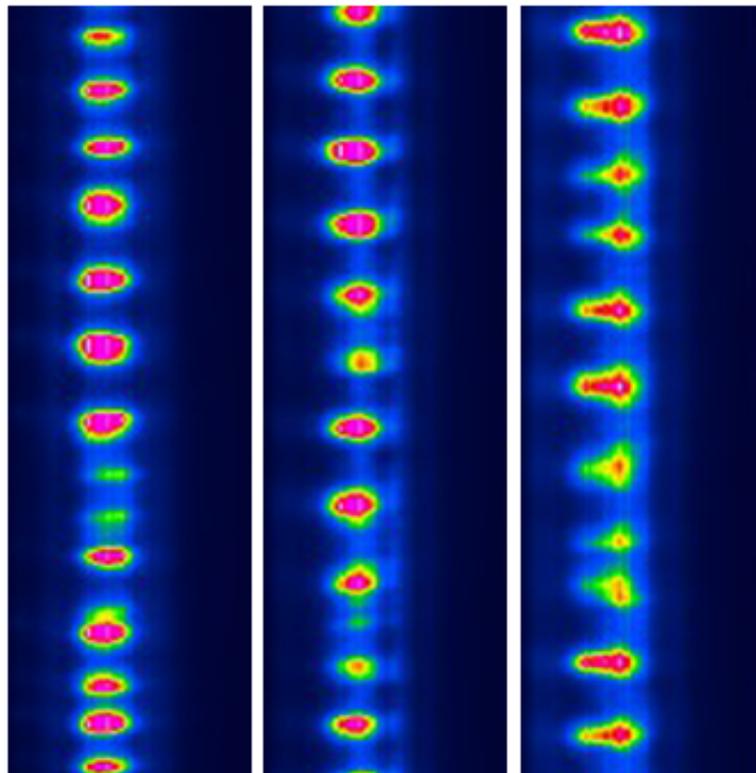


Abbildung 6.17: Hotspotringe auf der Faustseite bei Folgebremssungen jeweils nach Recovery-Programm

Auch in Umfangsrichtung ist ein Zusammenhang zwischen den Hotspotpositionen bei aufeinander folgenden Bremsungen erkennbar. Abbildung 6.18 zeigt die Temperaturverläufe auf Radien der jeweils größten Temperaturschwankungen auf der Faustseite bei

zwei Folgebremungen. Die Phasenverschiebung der in beiden Fällen dominanten elften Ordnung beträgt  $162^\circ$ . Somit entstehen bei Folgebremung Temperaturminima annähernd an Stellen, an denen bei unmittelbar vorhergehender Bremsung Hotspots aufgetreten sind.

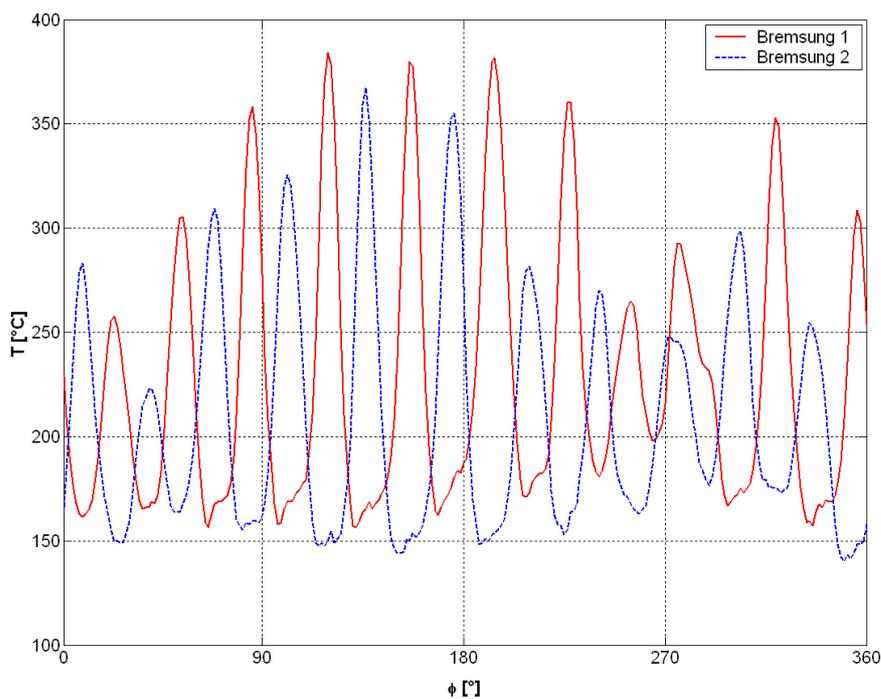


Abbildung 6.18: Temperaturverläufe auf der Faustseite bei zwei aufeinanderfolgenden Bremsungen

Die mit der Hotspotbildung und somit ungleichmäßiger Temperaturverteilung gekoppelte Bremsscheibenverformung zeigt ebenfalls bei aufeinanderfolgenden Bremsungen ein alternierendes Verhalten. Abbildung 6.19 zeigt die gemessene Topografie auf der Faustseite der Bremsscheibe nach einer Bremszeit von 25 Sekunden. Die zugehörigen Phasenlagen der Welligkeiten für die achte bis zwölfte Ordnung sind in der Abbildung 6.20 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass sich eine Phasenverschiebung in den auftretenden Deformationen bei aufeinanderfolgenden Bremsungen von annähernd  $180^\circ$  einstellt.

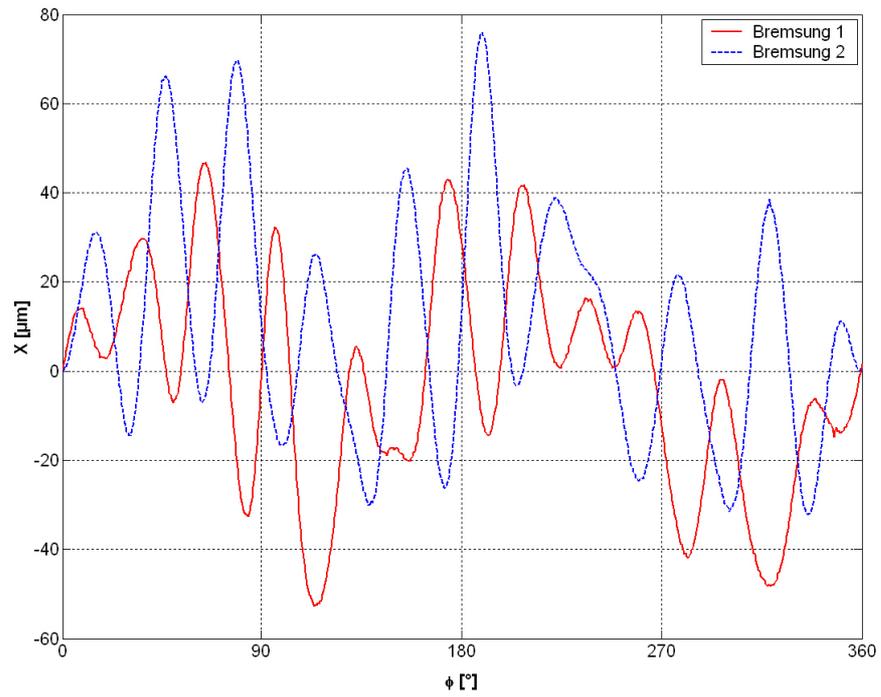


Abbildung 6.19: Oberflächenwelligkeit der Faustseite bei zwei aufeinanderfolgenden Bremsungen

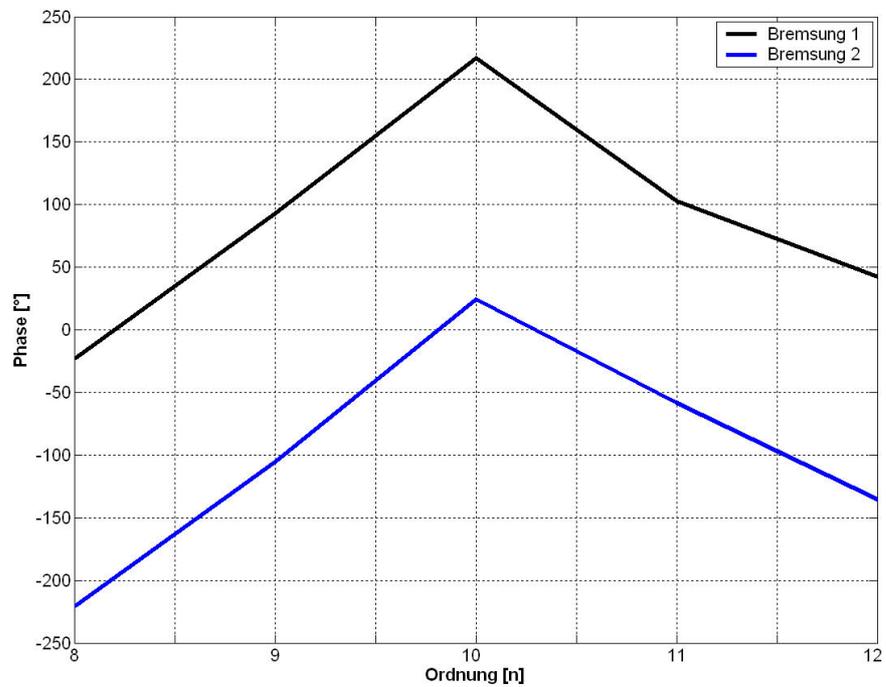


Abbildung 6.20: Phasenlage der Oberflächenwelligkeit bei zwei aufeinanderfolgenden Bremsungen

## 6.4 Einfluss der Bremsbelagbogenlänge

Wie im Abschnitt 2.3.1 dargestellt, ist die Hotspotanzahl nach der Theorie der Thermoelastischen Instabilitäten<sup>80</sup> von der Bogenlänge des Bremsbelags abhängig. Darüber hinaus ist die Gültigkeit der Theorie nur dann gegeben, wenn der Abstand zwischen einzelnen Hotspots in Umfangsrichtung mindestens so groß wie die Belaglänge ist, damit sich zur kinematischen Abstützung stets mindestens ein Hotspot in der Kontaktfläche zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe befindet. Auch die Theorie der Progressive Waviness Distortion sieht eine Abhängigkeit der Hotspotanzahl von der Belagbogenlänge vor. Bei experimentellen Untersuchungen im Rahmen der Studie<sup>81</sup> wurde die Feststellung einer höheren Hotspotanzahl bei Reduzierung der Belaglänge behauptet, wobei jedoch die Bestimmung der Hotspotanzahl aufgrund der Auswertungsform (Zählen der Hotspots durch visuelle Betrachtung von thermografischen Bildern, die jeweils 120 °-Ausschnitte der Bremsscheibe erfassten) ein hohes Maß an Subjektivität birgt.

Um objektive Aussagen über den Einfluss der Bremsbelagbogenlänge auf die Hotspotbildung zu ermöglichen, wurden Bremsbeläge aus einer Produktionscharge, wie in Abbildung 6.21 dargestellt, präpariert. Dabei wurde die Originalbogenlänge von 46 ° um 20 % und um 50 % (36,8 ° bzw. 23 °) reduziert (Abbildung 6.22). Alle Bremsbeläge wiesen eine Dicke von 5 mm auf und wurden mit jeweils neuen Bremsscheiben, ebenfalls aus einer Produktionscharge, eingesetzt. Nach einem Einlaufprogramm wurden Schleppbremsungen mit konstanter Geschwindigkeit (160 km/h) und konstantem Bremsmoment (310 Nm) durchgeführt. Die Anfangstemperatur betrug bei allen Versuchen 100 °C.

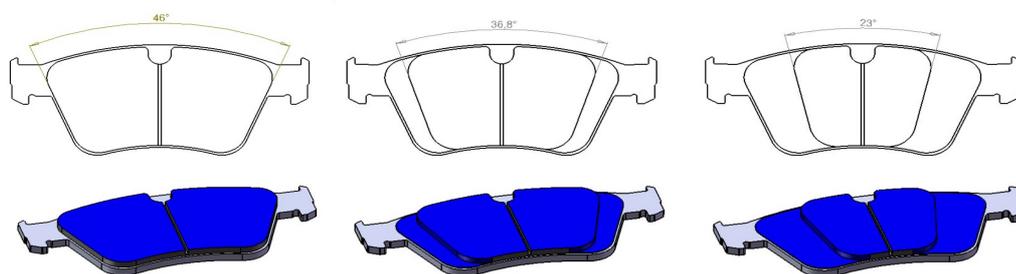


Abbildung 6.21: Schematische Darstellung der realisierten Belagbogenlängenvariation

<sup>80</sup> Lee: Frictionally Excited Thermoelastic Instabilities in Disk Brakes, 1993, S.612

<sup>81</sup> Panier: Investigation of hot spots, 2004, S.765 ff.



*Abbildung 6.22: Ausführungsbeispiel eines Bremsbelages mit um 50 % reduzierter Bogenlänge*

Abbildung 6.23 bietet eine Übersicht der sich nach einer Bremszeit von 25 Sekunden für die Versuche mit den unterschiedlichen Belagbogenlängen eingestellten Temperaturverläufe. Bei allen Varianten bestätigte sich die bereits beobachtete Tendenz zur Bildung eines Hotspottringes auf der Faustseite und zwei Hotspottringen auf der Kolben­seite.

In diesem besonderen Fall ist relativ zu den Versuchen mit den größeren Belagbogen­längen der Hotspottring auf der Faustseite beim Einsatz von Bremsbelägen der Bogen­länge von 23 ° weiter in Richtung Mitte der Bremsscheibe zu finden. Außerdem ist ein relativ wenig ausgeprägter zweiter Hotspottring weiter außen auf der Faustseite erkenn­bar. Dieses Erscheinungsbild ließ sich jedoch durch die Auswertung weiterer Versuche unter gleichen Randbedingungen nicht verallgemeinern. Temperaturen unterhalb 120 °C wurden bei dem eingestellten Messbereich der Infrarot-Thermokamera nicht erfasst, so dass diese als schwarze Flächen in der Darstellung zu erkennen sind. Es ist jedoch erkennbar, dass der Einsatz von Bremsbelägen mit der Bogenlänge von 23 ° zu einer insgesamt gleichmäßigeren Temperaturverteilung auf beiden Reibflächen führte, was unmittelbar auf eine gleichmäßigere Verteilung der Reibleistung über den Reibflächen schließen lässt.

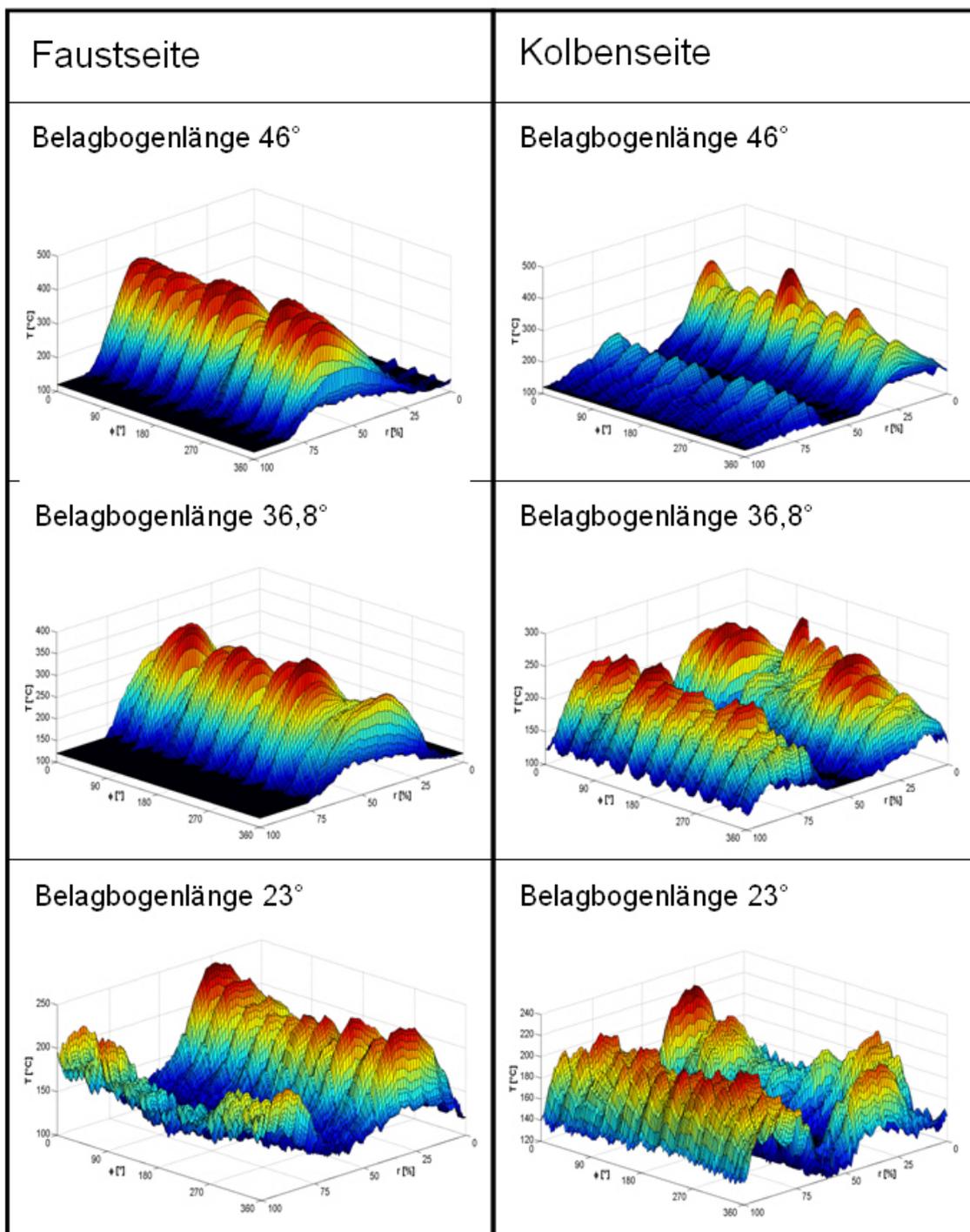


Abbildung 6.23: Temperaturverteilungen auf den Reibringoberflächen bei Variation der Belagbogenlänge

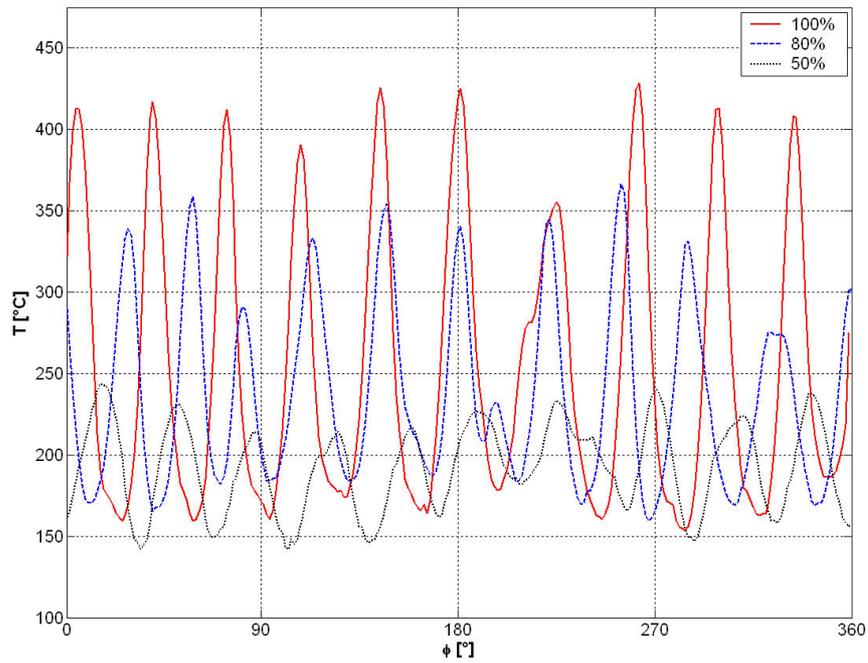


Abbildung 6.24: Temperaturverläufe im Bereich der Hotspots bei Variation der Belagbogenlänge

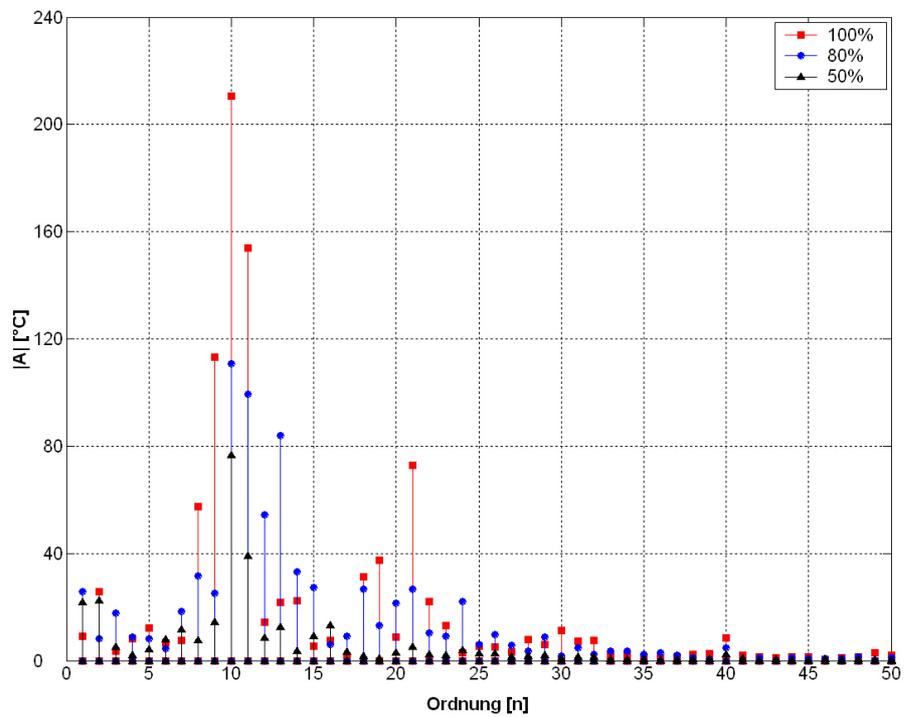


Abbildung 6.25: Amplitudenspektrum der Temperaturschwankungen bei Variation der Belagbogenlänge

Die Temperaturverläufe für Radien auf der Faustseite mit den jeweils größten Temperaturschwankungen sowie deren Amplitudenspektren sind in der Abbildung 6.24 bzw. Abbildung 6.25 dargestellt. Daraus wird zum einem ersichtlich, dass die Temperaturschwankungen durch Reduzierung der Belagbogenlänge deutlich abnehmen. Zum anderen wird gezeigt, dass keine Veränderung der dominanten Ordnung durch diese Modifikation bewirkt wurde, was sich auch beim Einsatz weiterer Brems Scheiben und entsprechend modifizierten Bremsbelägen bestätigt hat.

Die bei den vorherigen Versuchen festgestellte Übereinstimmung der dominanten Ordnungen von Temperaturschwankungen und Oberflächenwelligkeit zeigte sich ebenfalls bei den Versuchen zur Variation der Belagbogenlänge. In der Abbildung 6.26 und Abbildung 6.27 sind die gemessenen Verläufe der Oberflächentopografie bzw. deren Amplitudenspektren dargestellt. Daraus ist außerdem zu entnehmen, dass geringere Temperaturschwankungen zu ebenfalls kleineren Amplituden in der Oberflächenwelligkeit führen.

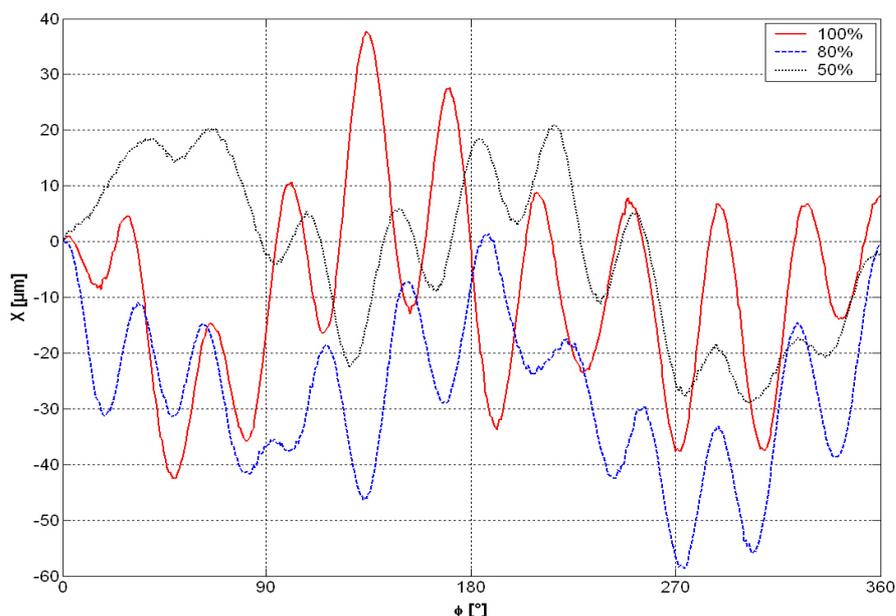


Abbildung 6.26: Gemessene Oberflächentopografie bei Variation der Belagbogenlänge

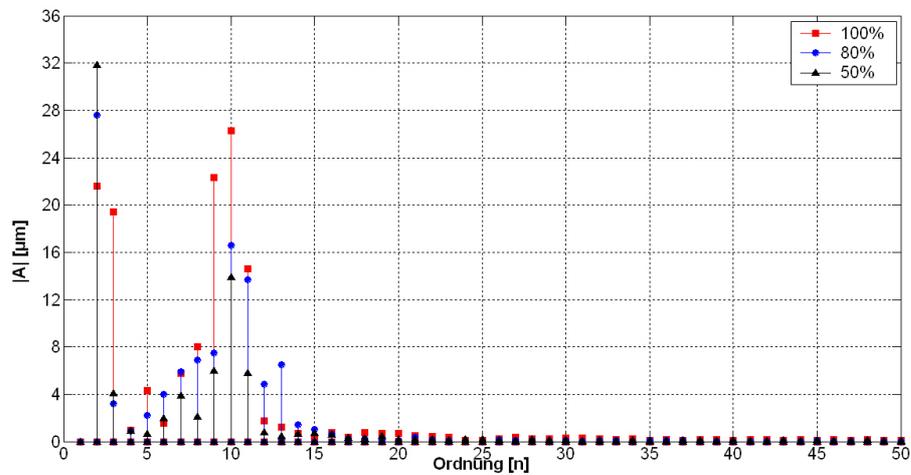


Abbildung 6.27: Amplitudenspektrum der Oberflächentopografie bei Variation der Belagbogenlänge

## 6.5 Entstehung von Temperaturschwankungen

Zur Untersuchung des Entstehungsprozesses von Hotspots wurde die Temperaturverteilung auf den Bremsscheibenoberflächen von Beginn der Bremsungen an analysiert. Im Vordergrund stand zunächst die Frage, ob der Entstehungsprozess durch einen Initial-Hotspot ausgelöst wird, d.h. ob vor dem Auftreten des in den vorigen Abschnitten vorgestellten Erscheinungsbildes ein Temperatursprung festgestellt wird.

Abbildung 6.28 zeigt die gemessenen Temperaturverläufe in Umfangsrichtung der Bremsscheibe für einen Radius, auf dem die Hotspotbildung am eindeutigsten ist. Bei der 50. Umdrehung (ca. 2,5 s nach Bremsdruckaufbau) sind Amplituden der Temperaturschwankungen für alle Ordnungen geringer als 2 °C und keine Ordnung stellt sich als eindeutig dominant heraus, wie in der Abbildung 6.29 dargestellt.

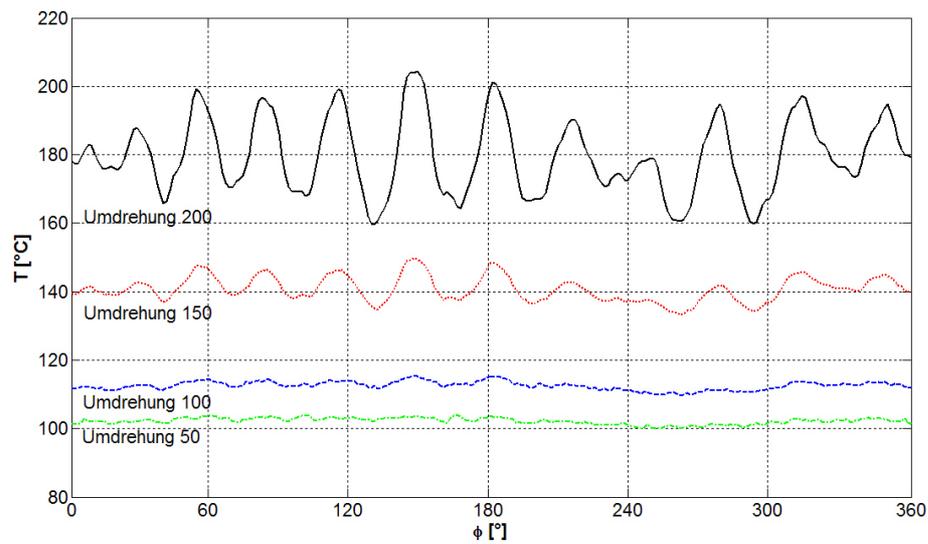


Abbildung 6.28: Brems Scheibentemperatur für verschiedene Umdrehungen einer Bremsung

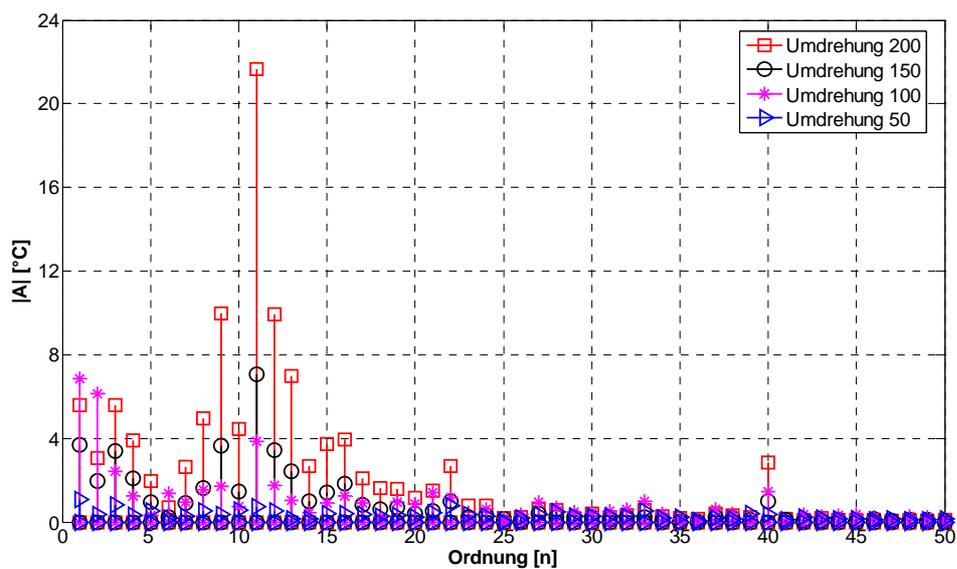


Abbildung 6.29: Amplitudenspektrum der Temperaturschwankungen für verschiedene Umdrehungen einer Bremsung

Bei der 100. Umdrehung sind bereits mehrere Erhöhungen im Temperaturverlauf erkennbar. Zu diesem Zeitpunkt zeigt sich unter den höheren Ordnungen die elfte als dominant, was sich im weiteren Verlauf der Bremsung verstärkt.

Abbildung 6.30 zeigt den Verlauf der Amplitude der Temperaturschwankung in der elften Ordnung für die ersten 200 Umdrehungen der Bremsung. Bis zur 50. Umdrehung

bleibt die Amplitude unter 1 °C und wächst danach zunächst progressiv an. Da keine Temperaturschwankungen anderer Ordnungen im betrachteten Bereich der Bremsung einen dazu analogen Verlauf aufweisen bzw. sich als dominant herausstellen, bewährt sich die Vermutung, dass die Entstehung der einzelnen Hotspots simultan erfolgt.

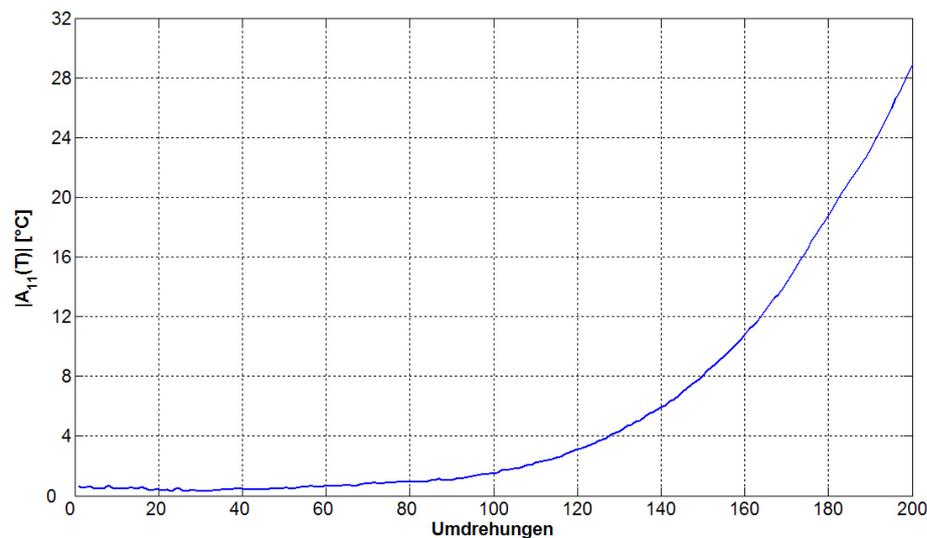


Abbildung 6.30: Amplitude von Temperaturschwankungen in der elften Ordnung für die ersten zweihundert Umdrehungen einer Bremsung

## 6.6 Bremsscheibenverformung

Wie in den vorigen Abschnitten dargestellt, stimmen beim Zustand von ausgebildeten Hotspots die jeweils dominanten Ordnungen von Temperaturschwankungen und Oberflächenwelligkeit überein. Außerdem wurde gezeigt, dass Hotspots auf den Bergen der wellenförmigen Verformung zu finden sind. In diesem Abschnitt wird die Frage behandelt, ob Hotspotbildung und Entstehung der wellenförmigen Verformung simultan erfolgen bzw. ob sich einer dieser Vorgänge zuerst ereignet und in diesem Zusammenhang eine Wirkungskette besteht.

Abbildung 6.31 zeigt das Amplitudenspektrum der an der Bremsscheibenoberfläche gemessenen Verformungen vor Bremsdruckaufbau für vier aufeinanderfolgende Umdrehungen. Die erste Ordnung (Scheibenschlag) ist dabei zur besseren Übersicht nicht dargestellt.

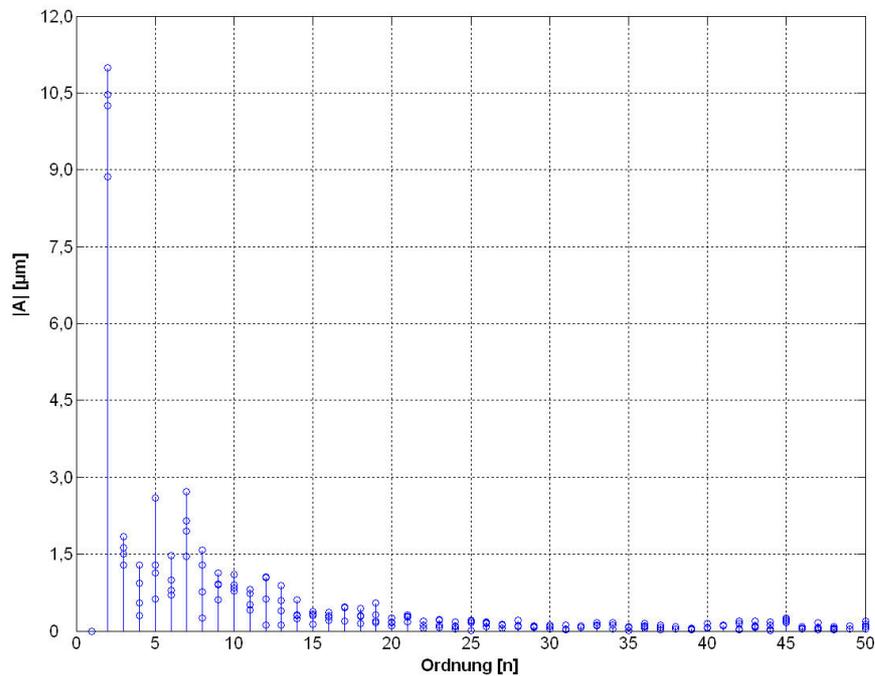


Abbildung 6.31: Amplitudenspektrum der Bremsscheibentopografie für vier aufeinanderfolgenden Umdrehungen vor Bremsdruckaufbau

Unmittelbar nach Beginn des Bremsvorgangs wird die Bremsscheibenform instabil, wie die in Abbildung 6.32 dargestellten Verläufe der durch einen an der Faustseite im mittleren Radius des Reibringes platzierten Abstandssensor erzeugten Signale für drei aufeinander folgende Umdrehungen verdeutlichen. Aufgrund der ortsfesten Anordnung der Sensoren zur Topografieerfassung bei einem solchen instationären Zustand der Bremsscheibenform ist die Bestimmung der tatsächlichen augenblicklichen Geometrie der rotierenden Bremsscheibe nicht möglich. Die Forminstabilität wird von allen zehn eingesetzten Sensoren gleichermaßen erfasst. Bereichsweise ist eine Welligkeit erkennbar, die in unregelmäßigen Abständen wiederkehrt. Eine Analyse dieser zeitweise auftretenden Verformung führte zu der Erkenntnis, dass diese mit der im Zustand ausgebildeter Hotspots gemessenen Welligkeit hinsichtlich Wellenlänge sowie Phasenlage übereinstimmen.

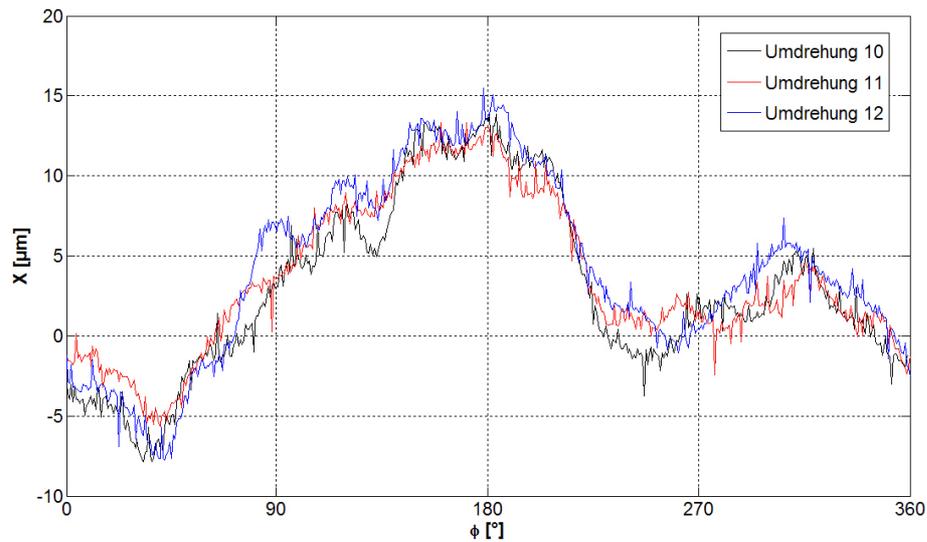


Abbildung 6.32: Forminstabilität der Bremsscheibe nach Bremsdruckaufbau

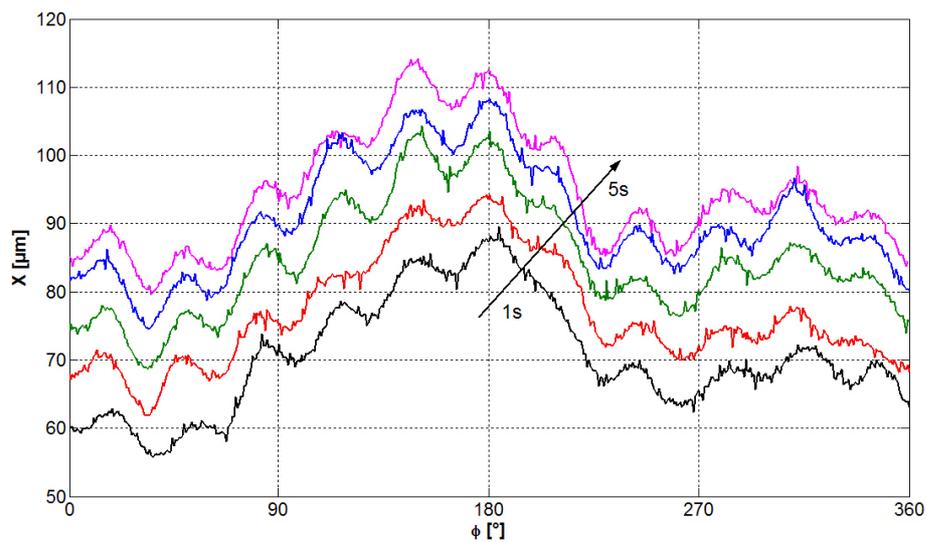


Abbildung 6.33: Oberflächentopografie zu verschiedenen Zeitpunkten der Bremsung

Abbildung 6.33 zeigt die gemessene Oberflächentopografie über den Bremsscheibenumfang für fünf Umdrehungen in den ersten fünf Sekunden nach Bremsdruckaufbau. Die Phasenlage der Welligkeit (11. Ordnung) für die dargestellten Verläufe befindet sich in einem zwischen  $\pm \pi/6$  variierenden Bereich. Die zwei unteren Verläufe (ca. 20. bzw. 40. Umdrehung) zeigen die gemessenen Oberflächentopografien noch während der Phase, in der sich die Bremsscheibenform als instabil zeigte, d.h. bei Umdrehungen davor bzw. danach waren die darin erkennbaren Welligkeiten nicht feststellbar. Die mittlere Linie stellt die Bremsscheibentopografie nach ca. 60 Umdrehungen dar. Zu dem

entsprechenden Zeitpunkt ist hinsichtlich der Welligkeit bereits ein formstabiler Zustand feststellbar.

Für die betrachtete Bremsung stabilisiert sich die Brems Scheibenform nach knapp zwei Sekunden zunehmend. Abbildung 6.34 zeigt die Verläufe der Signale des Abstandssensors für die Umdrehungen 47-50, d.h. bevor der Beginn der Hotspotbildung feststellbar ist (vgl. Abbildung 6.30 und Abbildung 6.29).

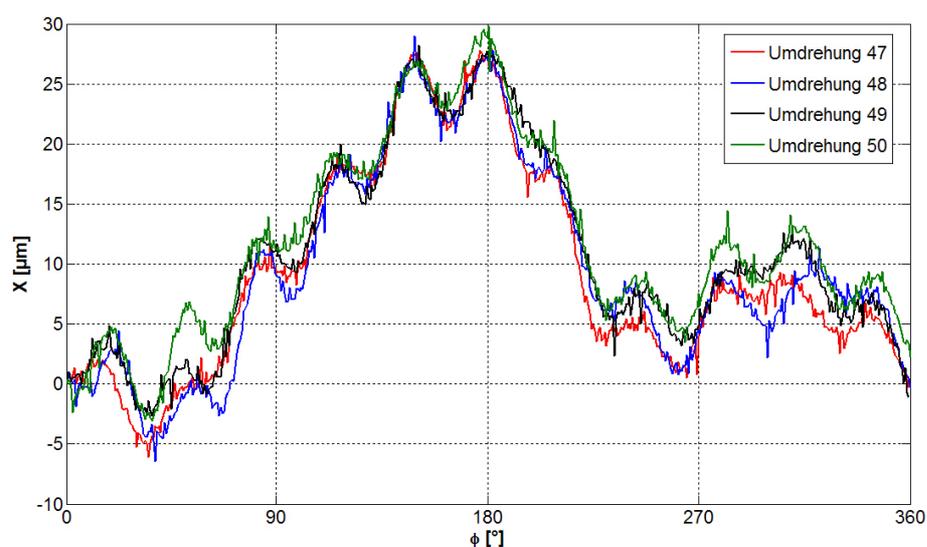


Abbildung 6.34: Oberflächentopografie bei vier aufeinanderfolgenden Umdrehung vor Hotspotbildung

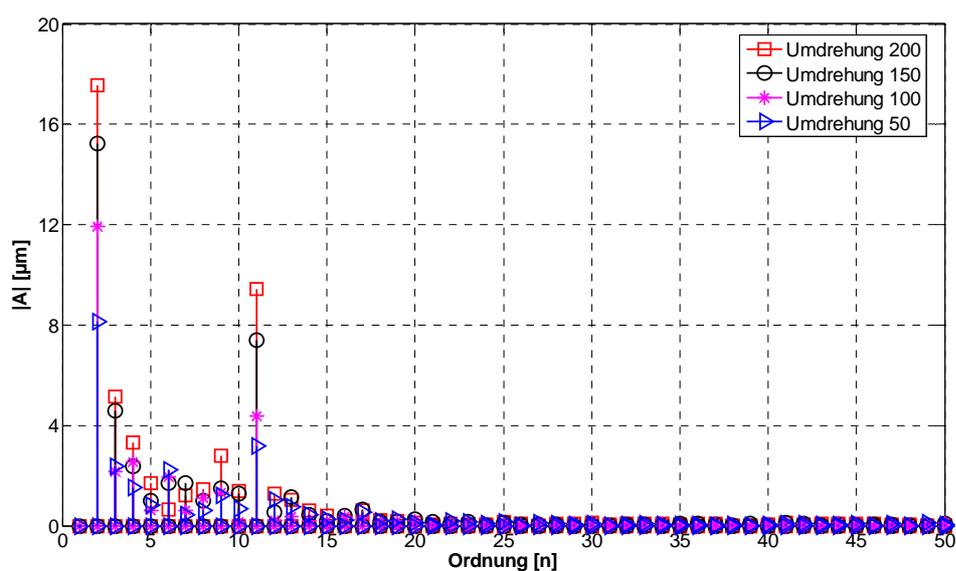


Abbildung 6.35: Amplitudenspektren der Brems Scheibenoberflächentopografie zu unterschiedlichen Zeitpunkten einer Bremsung

Bereits in dieser Phase zeigt sich die elfte Ordnung als dominant unter den höheren Ordnungen im Amplitudenspektrum der Verwellung der Bremsscheibentopografie, wie in der Abbildung 6.35 dargestellt. Die Phasenlage der einzelnen Verläufe befinden sich in einem Band von  $\pm \pi/8$ .

Die dreidimensionale Darstellung der Bremsscheibentopografie in Abbildung 6.36 verdeutlicht die Form der sich einstellenden Verwellung in der 47. Umdrehung, d.h. zu Beginn der formstabilen Phase. Diese erstreckt sich vom inneren bis zum äußeren Reibringradius und ist gerade zur Scheibenrotationsachse ausgerichtet.

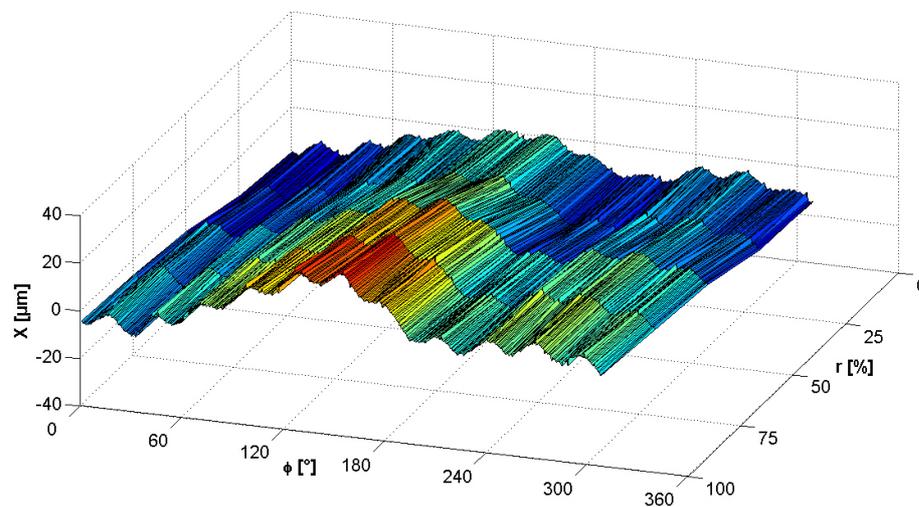


Abbildung 6.36: Dreidimensionale Darstellung der Bremsscheibentopografie in der 47. Umdrehung

Eine direkte Gegenüberstellung der jeweiligen Wachstumsraten der Amplituden der elften Ordnung für Verwellung und Temperaturschwankungen bei den ersten 300 Umdrehungen der Bremsung gibt Abbildung 6.37 wieder. Bereits zu Beginn der Bremsung stellt sich eine Welligkeit der elften Ordnung ein, die sich durch deutliches Ansteigen der Amplitude bemerkbar macht. Schwankungen der Temperaturverteilung in der gleichen Ordnung können zunächst dagegen faktisch nicht festgestellt werden. Die Amplitude der Welligkeit nimmt unmittelbar nach Druckaufbau zunächst deutlich stärker als die Amplitude der Temperaturschwankungen zu. Erst wenn eine deutliche Zunahme der Amplitude der Verwellung stattgefunden hat und somit eine ausgeprägte wellenförmige Deformation der Bremsscheibe vorliegt, weist die Amplitude der Temperaturschwankungen eine deutlich höhere Zuwachsrate auf. In der Abbildung 6.38 sind jeweils die einzelnen Verläufe der Amplituden von Temperaturschwankungen sowie der Oberflä-

chenwelligkeit in der elften Ordnung für die ersten zweihundert Umdrehungen dargestellt.

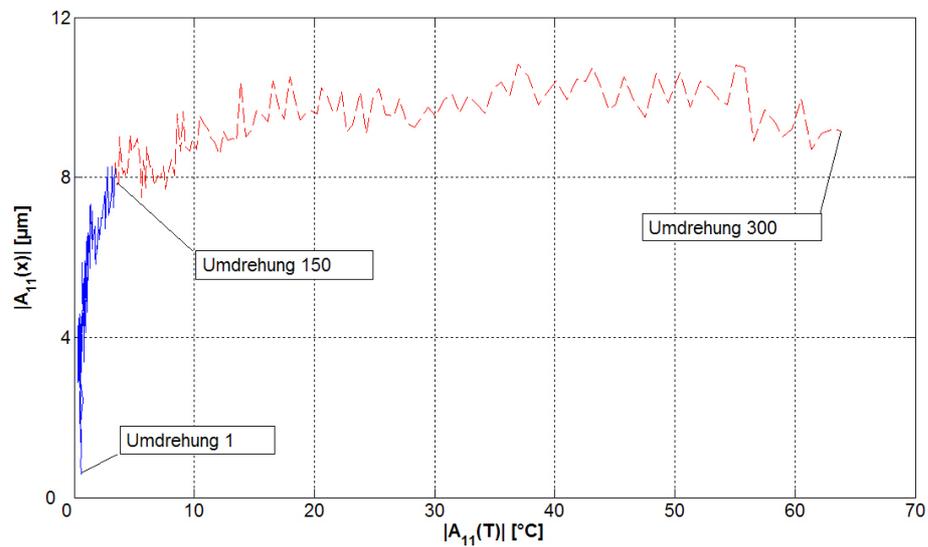


Abbildung 6.37: Verhältnis zwischen den Amplituden elfter Ordnung für Verwelligkeit und Temperaturschwankungen bei den ersten 300 Umdrehungen der Bremsung

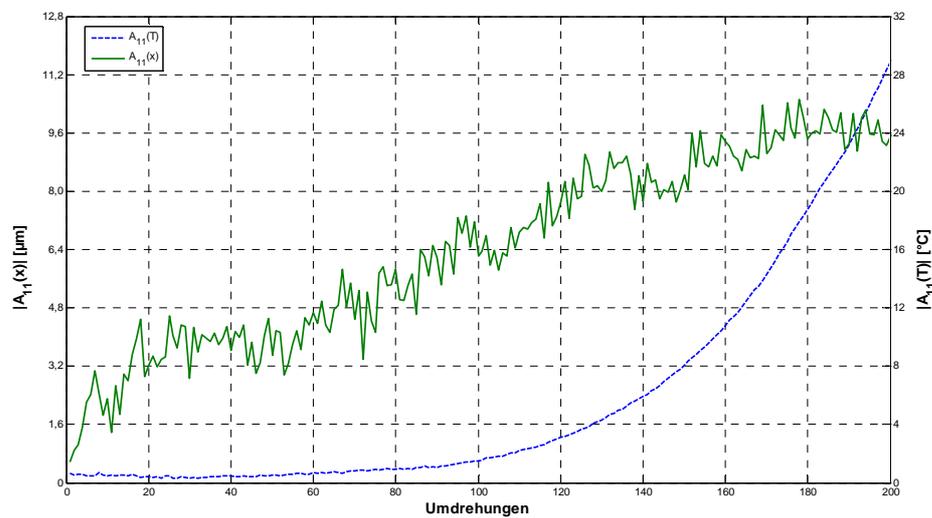


Abbildung 6.38: Verlauf der Amplituden elfter Ordnung für Verwelligkeit und Temperaturschwankungen bei den ersten 200 Umdrehungen der Bremsung

### **6.6.1 Ergänzende Untersuchungen**

Die durchgeführten Schleppbremsungen mit weiteren Brems scheiben unter gleichen Bedingungen lieferten bezüglich der Welligkeitsbildung vor Hotspotentstehung jeweils für die erste Schleppbremsung analoge Ergebnisse. Dabei wurde festgestellt, dass dem Beginn der Hotspotbildung eine wellenförmige Verformung der Brems scheibe vorausgeht. Es gilt nun zu prüfen, ob dieser Sachverhalt bei der Variation der Versuchsbedingungen ebenfalls feststellbar ist.

### **6.6.2 Folgebremmung**

Die Verläufe der Amplitudenschwankungen sowie der Oberflächenwelligkeit in der elften Ordnung bei einer Wiederholungsbremmung unter gleichen Anfangsbedingungen sind in der Abbildung 6.39 dargestellt. Zwischen den einzelnen Bremsungen wurde ein „Recovery-Programm“ durchgeführt, bestehend aus 10 Bremsungen von 80 km/h auf 30 km/h mit einem Bremsdruck von 30 bar. Bereits zu Beginn der Bremsung ergibt die Ordnungsanalyse der Signale der Thermobildkamera eine Temperaturschwankung von etwa 4 °C. Ob es sich jedoch dabei tatsächlich um Temperaturschwankungen handelt, ist unklar. Durch den Einsatz der Thermobildkamera unter verschiedenen Versuchsbedingungen wurde festgestellt, dass lokaler Bremsbelag Auftrag aus vorherigen Bremsungen den Emissionsgrad der Brems scheibenoberfläche lokal verändern kann und somit zu geringfügigen Verfälschungen bei der Temperaturmessung führt. Das Vorhandensein solcher Ablagerungen konnte üblicherweise nach der Hotspotbildung visuell wahrgenommen werden. Die Abtragung dieser Ablagerungen könnte auch die Erklärung für den leichten Abfall der als Amplitude der Temperaturschwankungen wiedergegebenen Werte bis zur 140. Umdrehung liefern. Tieferegehende Analysen, die diesen Sachverhalt belegen könnten, liegen jedoch nicht vor.

Das Diagramm liefert die Erkenntnis, dass auch bei der Folgebremmung eine Zunahme der Amplitude der gemessenen Oberflächenwelligkeit vor der Entstehung von Temperaturschwankungen in der elften Ordnung und somit vor der Hotspotbildung festgestellt wird.

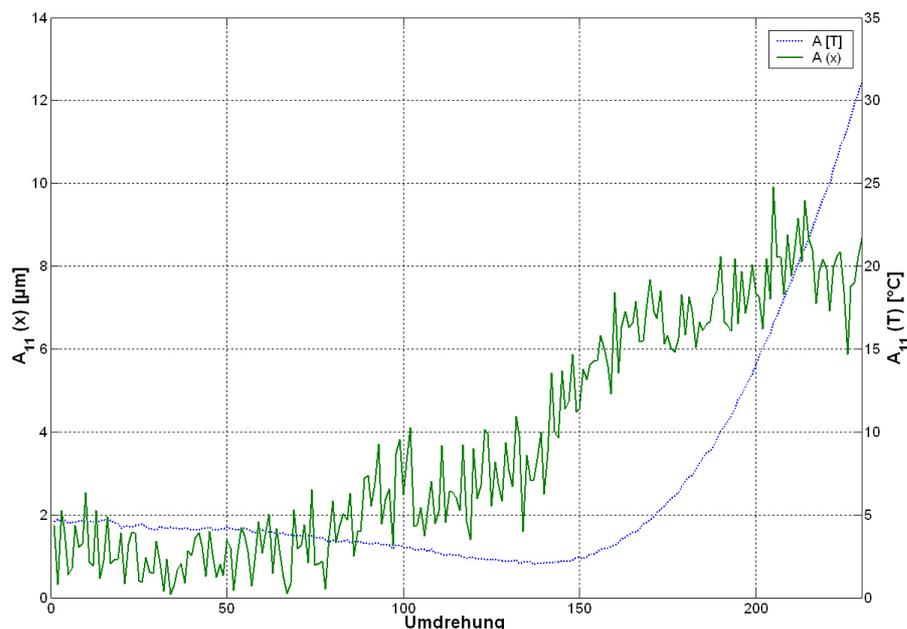


Abbildung 6.39: Verlauf der Amplituden elfter Ordnung für Verwelligung und Temperaturschwankungen bei einer Folgebremung

### 6.6.3 Bremsungen mit Bremsbelägen höherer Kompressibilität

Zahlreiche in der Literatur vorgestellte Untersuchungen belegen, dass die Bildung von Hotspots durch den Einsatz von Bremsbelägen höherer Steifigkeit begünstigt wird. Bei Untersuchungen zur Erforschung dieses Einflusses wird üblicherweise die Bremsbelagdicke variiert, um weitere Eigenschaften des Reibmaterials konstant zu halten. Aus diesem Grunde wurden Experimente zur Überprüfung des Zusammenhangs zwischen Welligkeitsbildung und Temperaturverteilung beim Einsatz von Bremsbelägen höherer Kompressibilität durchgeführt. Dazu wurden Beläge mit einer dem Neuzustand entsprechenden Dicke von 14 mm eingesetzt. Aufgrund der Prüflingsverfügbarkeit und des zeitlichen Versatzes zwischen den Versuchsreihen, stammen die eingesetzten Bremscheiben aus einer anderen Produktionscharge als die aus den im vorigen Abschnitt vorgestellten Versuchen. Sie weisen zwar dieselbe Geometrie auf, wurden jedoch im Herstellungsprozess einer als Spannungsarmglühen bezeichneten thermischen Behandlung unterzogen.

Das Experiment erfolgte wieder durch Schleppbremsen mit konstanter Geschwindigkeit (160 km/h) und konstantem Bremsmoment (310 Nm).

Abbildung 6.40 zeigt die Verläufe von Temperaturschwankungen und Oberflächenwelligkeit. Bei der betrachteten Bremsung ist nach ca. 200 Umdrehungen eine kontinuierliche Zunahme der Amplitude der Welligkeit in der zehnten Ordnung feststellbar. Diese

Amplitude beträgt nach 500 Umdrehungen ca. 4  $\mu\text{m}$ . Temperaturschwankungen bleiben in der zehnten Ordnung dagegen unterhalb 1  $^{\circ}\text{C}$ .

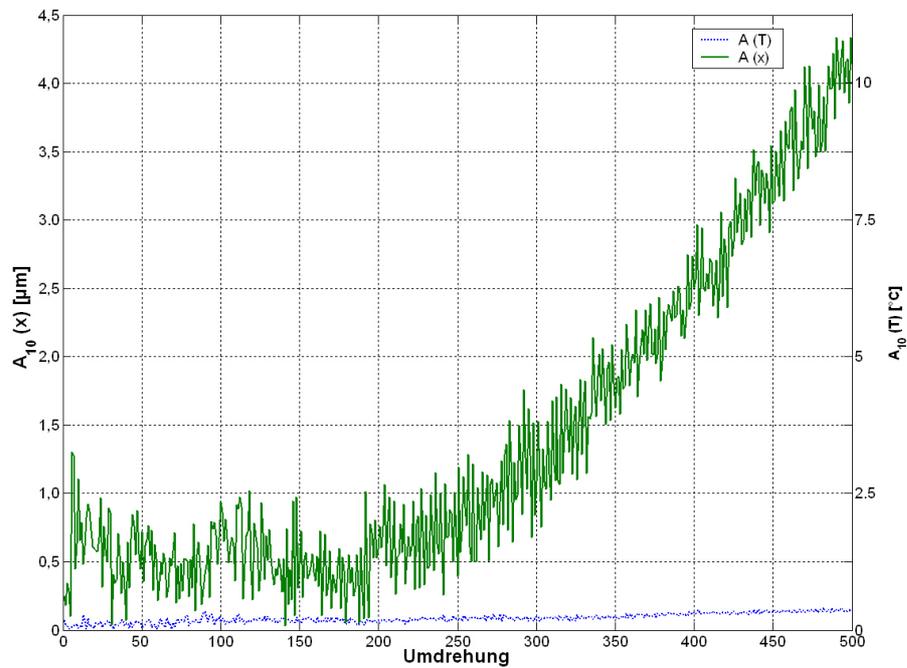


Abbildung 6.40: Verlauf der Amplituden elfter Ordnung für Verwellung und Temperaturschwankungen bei Anwendung von kompressibleren Bremsbelägen

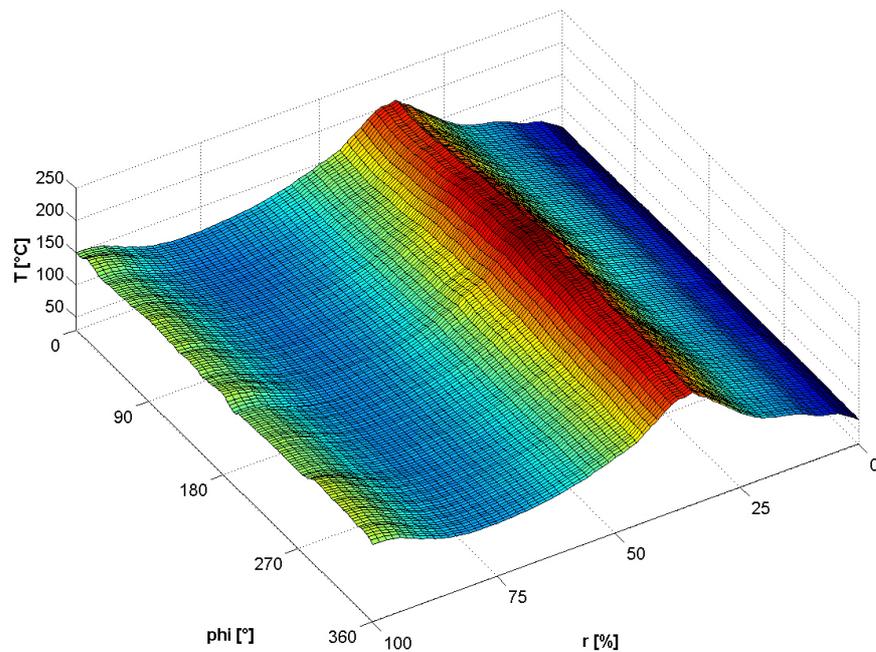


Abbildung 6.41: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung auf der Faustseite nach 500 Umdrehungen

Abbildung 6.41 zeigt die sich nach 500 Umdrehungen eingestellte Temperaturverteilung auf der faustseitigen Bremsscheibenoberfläche. Zu erkennen ist in erster Linie ein mittig platziertes Hotband. Die Bildung von Hotspots ist durch den Einsatz der kompressibleren Bremsbeläge allerdings nicht feststellbar.

#### 6.6.4 Geschwindigkeitsvariation bei konstanter Bremsleistung

Der Zusammenhang zwischen Bremsscheibenwelligkeitsbildung und Hotspotentstehung wurde zusätzlich durch Variation (bezogen auf den im Abschnitt 6.6 vorgestellten Versuch) der Geschwindigkeit bei der Schleppbremsung untersucht. Das Bremsmoment wurde dabei so angepasst, dass sich dieselbe Reibleistung wie in den oben beschriebenen Bremsungen ergab. Abbildung 6.42 zeigt die sich ergebenden Amplitudenverläufe von Oberflächenwelligkeit und Temperaturschwankungen im Verlauf einer Schleppbremsung mit 140 km/h und konstantem Bremsmoment von 354 Nm. Ab ca. der 80. Umdrehung wird eine Zunahme der Welligkeit festgestellt. Temperaturschwankungen nehmen nach der 100. Umdrehung zu. Eine ausgeprägte Hotspotbildung wurde bei dieser Geschwindigkeits-Bremsmoment Kombination nicht festgestellt.

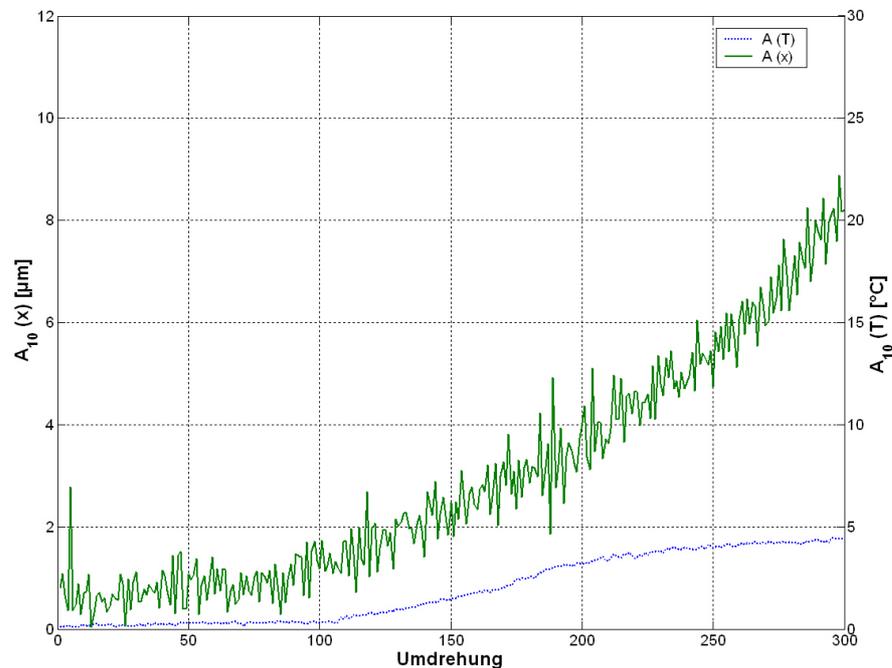


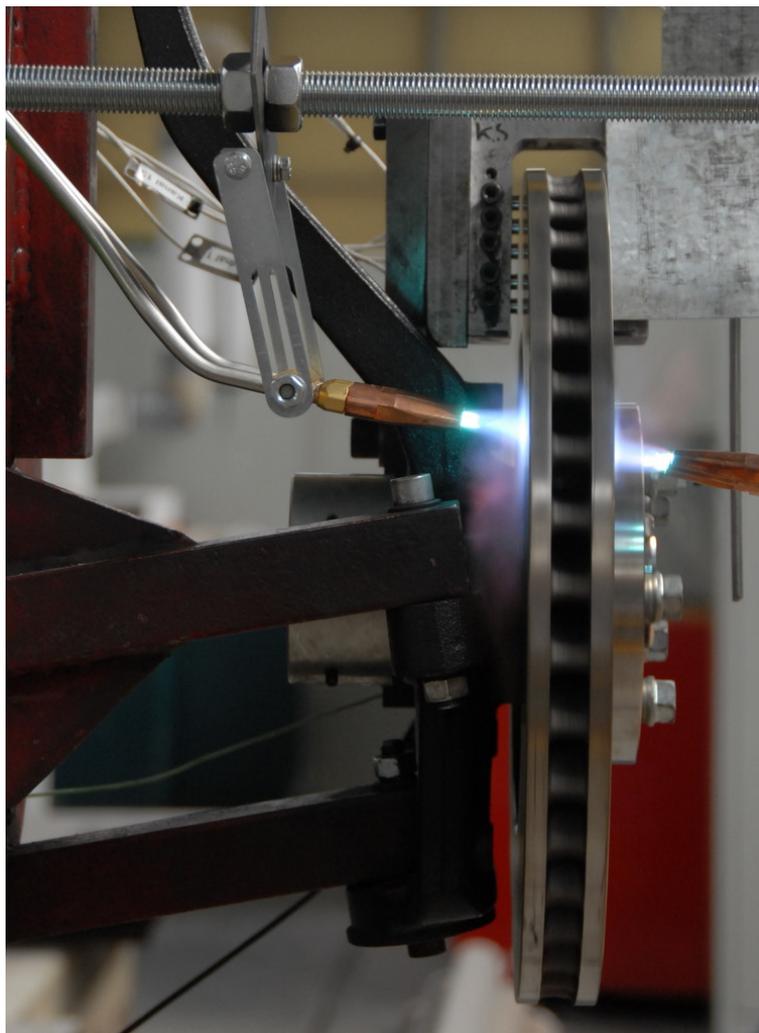
Abbildung 6.42: Verlauf der Amplituden elfter Ordnung für Verwellung und Temperaturschwankungen bei Geschwindigkeitsverringern und Erhöhung des Bremsmoments

## **6.7 Bremsscheibenverformung unter rein thermischer Belastung**

Die Ergebnisse der Bremsversuche zeigen, dass die Bremsscheibe eine wellige Form annimmt, bevor Temperaturschwankungen in Umfangsrichtung festgestellt werden können. Somit lässt sich vermuten, dass die Verwellung allein durch eine Erwärmung entsteht, ohne dass eine thermomechanische Kopplung durch den Reibvorgang benötigt wird. Daher wurde zur Untersuchung der Welligkeitsbildung bei gleichmäßigem Wärmeeintrag ein Prüfaufbau realisiert, der die Bestimmung der Bremsscheibenverformung bei rein thermischer Belastung ermöglicht. Da prinzipbedingt bei diesem Versuchsaufbau eine Hotspotbildung ausgeschlossen ist, liegt der Zweck des Versuchs in der Überprüfung, ob eine wellenförmige Bremsscheibenverformung auf diese Weise hervorgerufen wird.

### **6.7.1 Versuchsaufbau und Versuch**

Zur Bestimmung des Verformungsverhaltens der Bremsscheibe bei rein thermischer Belastung wurde ein spezieller Prüfstand aufgebaut. Dieser ist in Abbildung 6.43 dargestellt. Dabei ist die Scheibe wie beim Schwungmassenprüfstand am Original-Achsschenkel befestigt und wird über einen Elektromotor angetrieben. Die Temperatur der Reibringe wird mittels Thermoschleifensensor erfasst. Zur manuellen Kontrolle der Temperaturverteilung während des Versuchs wurden weitere Thermolemente eingesetzt. Zwei Propangasbrenner (bzw. Sauerstoff-Acetylen) erhitzen die Scheibe von beiden Seiten. Zur Messung der Scheibenverformung kommen wieder kapazitive Sensoren zum Einsatz, die wie bei den Versuchen am Schwungmassenprüfstand angebracht sind.



*Abbildung 6.43: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Verformungsverhaltens der Bremsscheibe bei rein thermischer Belastung*

Beim Versuch wurde die Bremsscheibe bei konstanter Drehzahl von 100 U/min (äquivalent zu den Prüfstandsgeschwindigkeiten von ca. 13 km/h) mit Sauerstoff-Acetylen bzw. mit Propangasbrennern bis zu einer Oberflächentemperatur von 240 °C erhitzt. Die Oberfläche der Bremsscheibe ist vor, während und nach der Bremsung mit den kapazitiven Wegsensoren vermessen worden, wobei vor Erhitzung keine Bremsscheibenwelligkeit festgestellt wurde. Die erreichbare Heizleistung mit diesem Versuchsaufbau beträgt nach Abschätzung anhand der jeweils gemessenen Temperaturanstiege nur ca. ein Sechstel von der Wärmeleistung der dargestellten Schlepptbremsungen.

### 6.7.2 Versuchsergebnisse

Durch die Erhitzung mit den Brennern wurden auf den Bremscheibenoberflächen zu beliebigen Zeitpunkten während der Versuchsdauer jeweils konstante Temperaturen gemessen. Vor Beginn der Erhitzung wurde bei der Bremscheibe keine Welligkeit festgestellt.

Abbildung 6.44 zeigt beispielhaft den Verlauf des Wegsignals am mittleren Reibradius der Bremscheibe während der Erwärmung bei einer Untersuchungstemperatur von 160 °C. Festgestellt wurde die Bildung einer welligen Verformung der 8. Ordnung. Die Amplitude der einzelnen Wellen betrug bis zu ca. 5 µm und ist somit vergleichbar mit den bei Bremsversuchen gemessenen Anfangswelligkeiten.

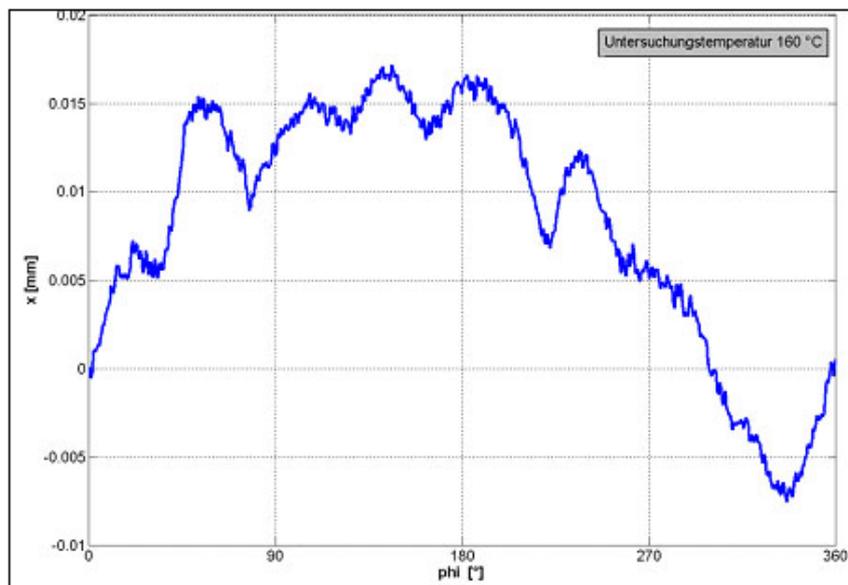


Abbildung 6.44: Topografie eines Reibrings während der Erwärmung

## 7 Überprüfung der Hypothesen

**Hypothese 1.1:** Hotspots entstehen bei aufeinanderfolgenden Bremsungen immer an den gleichen Stellen.

**Hypothese 1.2:** Es gibt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den Positionen der Hotspots bei aufeinanderfolgenden Bremsungen, der durch eine definierte Phasenverschiebung beschrieben werden kann.

**Ergebnis:** Die Positionen der auftretenden Hotspots bei aufeinander folgenden Bremsungen wiesen auf den jeweiligen Reibflächen stets eine Phasenverschiebung von annähernd  $180^\circ$  auf, so dass ein zyklisches Alternieren der Positionen festgestellt wurde. Die Hypothese 1.1 wurde falsifiziert und Hypothese 1.2 bewährte sich.

**Schlussfolgerungen:** Das zyklische Alternieren der Hotspotpositionen deutet auf das Vorhandensein eines durch die Hotspotbildung verursachten Memory-Effektes hin. Die im PWD getroffene Aussage von festen Hotspotpositionen trifft für das untersuchte System nicht zu.

**Hypothese 2.1:** Die Reduzierung der Bogenlänge des Bremsbelags führt zu einer Erhöhung der Hotspotanzahl.

**Ergebnis:** Bei Bremsungen unter gleichen Randbedingungen und Reduzierung der Belagbogenlänge um 20 % bzw. 50 % ergaben sich jeweils im Vergleich mit den Ergebnissen aus Versuchen mit voller Belagbogenlänge identische Hotspotanzahlen. Die Hypothese wurde falsifiziert.

**Schlussfolgerungen:** Eine Reduzierung der Belaglänge im oben beschriebenen Umfang bewirkt keine Veränderung der Hotspotanzahl. Modellvorstellungen, die eine Veränderung der Hotspotanzahl durch eine solche Modifikation vorhersagen, besitzen für die Anwendung auf das getestete System keine Gültigkeit und sind diesbezüglich falsifiziert.

**Hypothese 2.2:** Der Abstand zwischen zwei Hotspots ist immer kleiner als die Länge des Bremsbelags in Umfangsrichtung.

**Ergebnis:** Durch den Einsatz von Bremsbelägen mit der Bogenlänge von  $23^\circ$  wurde die Bildung von 10 Hotspots festgestellt. Der mittlere Abstand zwischen den einzelnen

Hotspots beträgt dementsprechend  $36^\circ$  und ist somit größer als die Bogenlänge des Bremsbelags. Die Hypothese wurde falsifiziert.

**Schlussfolgerungen:** Die Modellvorstellung zur Hotspotbildung im Rahmen der Theorie der Thermoelastischen Instabilitäten, welche die Aussage in obiger Hypothese beinhaltet, ist für das getestete System ungültig und wurde somit falsifiziert.

**Hypothese 3:** Vor der Entstehung von periodischen Temperaturschwankungen auf den Bremsscheibenreibflächen in Umfangsrichtung wird das Auftreten eines ersten Hotspots festgestellt.

**Ergebnis:** Durch Analyse der Temperaturverteilung auf den Bremsscheibenoberflächen vor Hotspotentstehung konnten keine lokalen (also innerhalb der typischen Hotspotwellenlänge) Temperaturerhöhungen von mehr als  $1^\circ\text{C}$  festgestellt werden. Es wurde dagegen eine simultane Hotspotbildung in der sich für die jeweilige Bremsung einstellenden Hotspotordnung festgestellt, ohne dass sich zuvor niedrigere Ordnungen der Temperaturschwankungen als dominant herausstellten. Da sich jedoch der Begriff „Temperatursprung“ beliebig definieren lässt, ist die Falsifikation der Hypothese mit der im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Hotspot-Definition gekoppelt und innerhalb der Grenzen des beschriebenen Ergebnisses gegeben.

**Schlussfolgerungen:** Ein Initiierungsprozess der Hotspotbildung durch eine lokale Temperaturerhöhung fand nicht statt. Die simultane Entstehung von Hotspots über den Bremsscheibenumfang lässt eine Initiierung des Hotspotentstehungsprozesses durch einen lokalen „Temperatursprung“ nicht zu.

**Hypothese 4.1:** Die Bremsscheibe weist bei ausgebildeten Hotspots eine Verwellung auf.

**Hypothese 4.2:** Anzahl von Hotspots und Wellen stimmen überein.

**Hypothese 4.3:** Position von Hotspots und Wellenbergen stimmen überein.

**Ergebnis:** Bei ausgebildeten Hotspots ist eine wellenförmige Verformung der Bremsscheibenoberfläche feststellbar. Diese weist die gleiche dominante Ordnung im Amplitudenspektrum sowie annähernd die gleiche Phasenlage wie die gemessenen Temperaturschwankungen im Hotspotbereich auf. Die Hypothesen 4.1-4.3 bewährten sich.

**Schlussfolgerungen:** Die Ergebnisse beleuchten Aspekte der Kopplung zwischen Temperaturschwankungen und Bremsscheibendeformation. Die in den Hypothesen beinhalteten Aussagen liefern den Nachweis für die in der Literatur oftmals getroffene Annah-

me, dass eine Kopplung zwischen den durch Hotspots hervorgerufenen Temperaturschwankungen in Umfangsrichtung und einer wellenförmigen Verformung der Brems-scheibe besteht.

**Hypothese 4.4:** Die Entstehung von Hotspots und die Ausbildung der Wellen erfolgen gleichzeitig.

**Hypothese 4.5:** Temperaturschwankungen bzw. Hotspots entstehen vor der Bildung einer Oberflächenwelligkeit der gleichen Ordnung.

**Hypothese 4.6:** Die Bildung einer Oberflächenwelligkeit erfolgt vor Hotspotentstehung bzw. bevor Temperaturschwankungen in der gleichen Ordnung entstehen.

**Ergebnis:** Eine wellenförmige Verformung der Bremsscheibenoberfläche wurde bei allen Versuchen vor der Entstehung von Temperaturschwankungen festgestellt. Die Verformung weist die gleiche dominante Ordnung sowie Phasenlage wie die anschließend auftretenden Hotspots auf. Bei Verwendung von Bremsbelägen höherer Kompressibilität verformte sich die Bremsscheibe wellenförmig, ohne dass es zur Bildung von Hotspots kam. Hypothesen 4.4 und 4.5 wurden falsifiziert. Hypothese 4.6 bewährte sich.

**Schlussfolgerungen:** Die Übereinstimmung der Anzahl und Positionen (Phasenlage) von Hotspots und Wellenbergen können als Nachweis für die Kopplung zwischen Topografieerhöhungen und erhöhter Reibleistung an diesen Stellen angesehen werden. Da die wellenförmige Verformung der Bremsscheibe dem Auftreten von Temperaturschwankungen in Umfangsrichtung vorausgeht, stellte die wellenförmige Verformung die Ursache für die Entstehung von Hotspots dar.

**Hypothese 5:** Wird die Bremsscheibe beidseitig mit einer in Umfangsrichtung zeitlich unveränderlichen Wärmequelle rein thermisch belastet, wird keine wellenförmige Verformung hervorgerufen.

**Ergebnis:** Auch bei rein thermischer Belastung bei annähernd konstanter Bremsscheibenoberflächentemperatur wurden wellenförmige Verformungen an der Bremsscheibe gemessen, die mit den festgestellten Anfangswelligkeiten bei den Bremsversuchen bezüglich Wellenanzahl und Amplitude vergleichbar sind. Die Hypothese wurde falsifiziert.

**Schlussfolgerungen:** Das Auftreten von wellenförmigen Verformungen an rein thermisch belasteten Bremsscheiben liefert den Nachweis dafür, dass die Bremsscheiben-

verwelling bei Absenz von hotspotartigen, lokalen Temperaturerhöhungen hervorgerufen wird.

Keine der in Abschnitt 2.3 vorgestellten Modellvorstellungen zum Entstehungsprozess von Hotspots lässt sich in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der experimentellen bringen. Tabelle 5 zeigt zusammenfassend eine Gegenüberstellung der Modellvorstellungen und Versuchsergebnissen.

Tabelle 7.1: Gegenüberstellung von Versuchsergebnissen und bekannten Modellvorstellungen

Versuch	Hypothesennummer.	TEI	PWD	Mehrfeldtheorie
<b>Hotspotposition</b> (Abschnitt 6.3)	1.1	n.a.	x	n.a.
<b>Hotspotanzahl/Belaglänge</b> (Abschnitt 6.4)	2.1	x	x	n.a.
<b>Hotspotabstand &lt; Belaglänge</b> (Abschnitt 6.4)	2.2	x	n.a.	n.a.
<b>Initialhotspot</b> (Abschnitt 6.5)	3	n.a.	n.a.	x*

\* Falsifikation eingeschränkt auf die Hotspotdefinition nach 5.5.1

## 7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die thermomechanische Belastung während des Bremsvorgangs führt zu einer auf beiden Reibringen gleichermaßen erkennbaren, wellenförmigen Verformung der Bremscheibe, die vor der Entstehung kohärenter Temperaturschwankungen festgestellt wird. Auch bei rein thermischer Belastung durch in Umfangsrichtung gleichmäßige Wärmezufuhr können vergleichbare Welligkeiten hervorgerufen werden.

Hotspots entstehen auf den Wellenbergen im Bereich von zuvor auftretenden Hotbands, die aufgrund ungleichmäßiger Flächenpressungsverteilung in radialer Richtung verursacht werden.

Die Bremsbelagdicke bestimmt bei gegebener Reibbelagmischung die Kompressibilität des Belages und beeinflusst dadurch die Hotspotbildung maßgeblich. Je steifer der Belag, desto größer die Ungleichmäßigkeit der Druckverteilung in der Kontaktfläche zwischen Bremsscheibe und Bremsbelag, so dass mit zunehmender Steifigkeit Druckspitzen auf den Wellenbergen größer werden. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass sich trotz Entstehung einer Grundwelligkeit keine Hotspotbildung ausbildet, wenn Bremsbeläge mit ausreichend großer Kompressibilität eingesetzt werden.

In der Literatur wird oftmals erwähnt, dass höhere Reibgeschwindigkeiten die Hotspotbildung begünstigen. Im Versuch wurde die Tendenz zur stärkeren Neigung zur Hotspotbildung mit Erhöhung der Reibgeschwindigkeit, auch unter Beibehaltung der Bremsleistung, bestätigt.

Durch Veränderung der Belagbogenlänge konnte keine Auswirkung auf die Hotspotanzahl festgestellt werden. Es bildeten sich bei den Versuchen zur Untersuchung des Einflusses der Belagbogenlänge mit allen Varianten zehn Hotspots, so dass sich daraus ein mittlerer Bogenabstand von  $36^\circ$  ergab. Die Bogenlängen der eingesetzten Beläge betragen  $46^\circ$ ,  $37^\circ$  und  $23^\circ$ . Somit wurde nachgewiesen, dass die Länge des Belags in Umfangsrichtung kleiner als der Abstand zwischen den einzelnen Hotspots sein kann. Mit Reduzierung der Belagbogenlänge ist jedoch unter Beibehaltung der Reibleistung die Amplitude der auftretenden Temperaturschwankungen deutlich gesunken.

Bei Bremsungen mit neuen Bremsscheiben und neuen Bremsbelägen nach Durchführung eines Einlaufprogramms, d.h. bevor Hotspots bei Verwendung dieser Komponenten erstmals auftraten, bildeten sich mit der verwendeten Radbremse bei der ersten Bremsung aus hohen Geschwindigkeiten grundsätzlich Hotspots auf der Faustseite der Bremsscheibe. Vorausgehend zur Hotspotbildung sind etwa in der Mitte des Reibrings deutlich höhere Temperaturen (Hotbanding) gemessen worden als in den radial inneren und äußeren Bereichen des Reibrings.

Hotspots traten bei aufeinanderfolgenden Bremsungen in radialer Richtung alternierend mittig auf einem Reibring bzw. in inneren und äußeren Bereichen auf dem Gegenüberliegenden auf. Bei Folgebremungen wurde zudem in Umfangsrichtung eine jeweilige Abwechslung der Hotspotpositionen um eine Phasenverschiebung von annähernd  $180^\circ$  auf beiden Reibringen festgestellt.

Unter Beibehaltung von Randbedingungen und Verwendung von Komponenten aus jeweils gleicher Produktionscharge wurde ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit der Hotspotbildung gezeigt. Es bildeten sich bei drei untersuchten Bremsscheiben und Belagsätzen jeweils elf Hotspots. Die Amplituden der Temperaturschwankungen betragen zum Auswertzeitpunkt  $142 \pm 6^\circ\text{C}$ , während die Amplituden der zugehörigen

Welligkeit Werte von  $37 \pm 3 \mu\text{m}$  aufwiesen. Beim Einsatz von geometrisch gleichen, jedoch aus unterschiedlichen Produktionschargen stammenden Bremsscheiben wurden teilweise davon abweichende Hotspotanzahlen festgestellt. In der überwiegenden Anzahl von Versuchen bildeten sich neun bis elf Hotspots, in Ausnahmefällen acht oder zwölf.

## **8 Kritik und Ausblick**

### **8.1 Zielerreichung und Gültigkeit**

Die Ergebnisse der Arbeit lassen erstmals die Ursachen-Wirkungs-Kette der Entstehung von Hotspots unter praxisnahen Bedingungen unter wissenschaftlich gültigen Maßstäben nachvollziehen.

Durch die regelmäßige Verteilung der Hotspots in Umfangsrichtung sowie der damit gekoppelten wellenartigen Bremsscheibenverformung ergeben sich entsprechend annähernd sinusförmige Verläufe von Bremsmoment- und Bremsdruckschwankungen. Aus diesem Grund bewährte sich die Analyse der ausgewerteten Größen anhand von Fourier-Transformationen, wodurch die Aussagen und Erkenntnisse als objektiv nachgewiesen sind.

Alle Ergebnisse wurden auf Reproduzierbarkeit geprüft, indem Wiederholungen der Versuchsreihen nach Austausch von Bremsscheibe und Bremsbelägen erfolgten. Darüber hinaus wurden die definierten Versuchsbedingungen bzw. das Konstanthalten von Anfangsbedingungen jeweils überprüft. Dadurch ist die Reliabilität der Ergebnisse sichergestellt.

Beim untersuchten System handelt es sich um eine Bremse, die in allen Eigenschaften ihrer Komponenten repräsentativ dem Serienstand bei aktuellen Fahrzeugen entspricht. Die Versuche wurden an Schwungmassenprüfständen durchgeführt. Eine Studie im Vorfeld dieser Arbeit durch den Industrie-Kooperationspartner belegte, dass eine hohe Übereinstimmung zwischen Ergebnissen von Prüfstands- und Fahrversuch bezüglich der Neigung von Bremssystemen zu Heißrubbeln besteht. Bei den Experimenten wurde das Bremssystem im Heißrubbeln-relevanten Bereich betrieben. Dies betrifft die Größen Geschwindigkeit, Bremsdruck, Anfangstemperatur der Bremsscheibe und Reibleis-

tung. Somit ist die in der Zielsetzung definierte Anforderung hinsichtlich Praxisnähe erfüllt, wenn auch die Validität sich vom Grundsatz her nur auf die gewählten Bremskomponenten beziehen kann.

## **8.2 Übertragbarkeit der Ergebnisse**

Untersuchungen zum Erscheinungsbild von Hotspots basieren auf orientierenden Experimenten mit unterschiedlichen Bremssystemen. Diese bestätigten im Wesentlichen verschiedene in der Fachliteratur bereits beschriebene Beobachtungen zur Hotspoterscheinungsform.

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Hauptergebnisse und die daraus ableitbaren Erkenntnisse beruhen auf Untersuchungen mit einem einzigen Bremssystem. Dadurch ergeben sich zwangsläufig Einschränkungen hinsichtlich einer Verallgemeinerung der für das untersuchte System gewonnenen Erkenntnisse. Wie jedoch bereits geschildert, handelt es sich bei der eingesetzten Bremse um ein System, das dem Serienstand in all seinen Eigenschaften repräsentativ entspricht. Deshalb ist keine unmittelbare Ableitung von Argumentationsketten gegeben, die grundsätzlich abweichende Verhaltensweisen bezüglich Hotspotbildung bei vergleichbaren Systemen begründen sollten.

## **8.3 Relevanz für die Praxis**

Erfahrungen aus der Bremsenentwicklungspraxis lassen keinen Zweifel bestehen, dass sich das Verhalten eines Bremssystems hinsichtlich der Neigung zum Auftreten von Heißrubbelp Problemen durch Maßnahmen am Bremssattel, an der Bremsscheibe und an den Bremsbelägen beeinflussen lässt.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich gezielt Maßnahmen ableiten, die zur Verringerung und eventuell sogar zur Vermeidung der Hotspotbildung und somit der damit gekoppelten Heißrubbelausschlag führen können.

Da die Hotspotbildung von einer bei thermomechanischer Belastung entstehenden Grundwelligkeit der Bremsscheibenoberfläche initiiert wird, lässt sich daraus unmittelbar der Ansatz ableiten, durch geeignete Maßnahmen die Ausbildung derartiger Deformationen möglichst zu vermeiden. Neben konstruktiven Maßnahmen kann in diesem Zusammenhang auch die Materialwahl zu einer Erhöhung der Robustheit der Bremsscheibe gegenüber dem Auftreten solcher wellenförmiger Verformungen beitragen. Auch die in radialer Richtung auf den Bremsscheibenoberflächen sowohl bei Hotspot-

bildung als auch bei reiner Bildung von Hotbands beobachtete konkave bzw. konvexe Verformung beeinträchtigt die Gleichmäßigkeit der Flächenpressungsverteilung maßgeblich, da sich der Kontakt zwischen Belag und Scheibe häufig ausschließlich auf diese relativ schmalen Bereiche reduziert. Aus diesem Grunde sind Maßnahmen anzustreben, die diese Art von Verformung möglichst reduzieren.

Auch die Eigenschaften der Bremsbeläge beeinflussen das Heißrubbelverhalten maßgebend. Die in diesem Zusammenhang bekannte wirksamste Maßnahme besteht darin, die Kompressibilität der Bremsbeläge zu erhöhen bzw. deren Steifigkeit zu reduzieren, da dadurch bei gegebener Grundwelligkeit an den Bremsscheibenoberflächen eine bessere Anpassung an die topologischen Unregelmäßigkeiten möglich ist. Somit ergibt sich eine gleichmäßigere Flächenpressungsverteilung und dementsprechend eine homogenere Verteilung der Reibleistung auf den Bremsscheibenoberflächen. Die Praxisauglichkeit einer solchen Maßnahme ist allerdings stark eingeschränkt, da die Verwendung von Bremsbelägen hoher Kompressibilität verschiedene Nachteile birgt. Zum einen nimmt das für den Bremskraftaufbau erforderliche Bremsflüssigkeitsvolumen bei kompressiblen Bremsbelägen zu, so dass dies insbesondere bei hoher Beanspruchung (Fading) sicherheitskritisch sein kann. Zum anderen führt eine Belagkompressibilitätserhöhung zu einem stark belagverschleißabhängigen, weichen Bremspedalgefühl, welches es nach heutigen Entwicklungsanforderungen in aller Regel zu vermeiden gilt.

Eine deutliche Reduzierung der Temperaturschwankungen durch Hotspots bei Bremsungen mit jeweils gleicher Reibleistung wurde durch Verkürzung der Bremsbelagbogenlänge bewirkt. Dadurch können Bremsmoment und -druckschwankungen deutlich reduziert werden. Jedoch ergibt sich dadurch bei gleicher Reibbelagzusammensetzung und gleichem Lastkollektiv ein höherer Verschleiß. Die sich bei gleicher Spannkraft ergebende höhere Flächenpressung hat zudem zur Folge, dass größere elastische Verformungen des Reibbelags hervorgerufen werden, wodurch ebenfalls eine Zunahme des erforderlichen Bremsflüssigkeitsvolumens verursacht wird.

Da sich der Kontaktbereich zwischen Bremsbelägen und Bremsscheibe stark auf die Bereiche der Hotspotringe konzentriert, könnte ein temperaturabhängiges Verschleißverhalten der Bremsbeläge eine wirksame Maßnahme zur Abschwächung der Selbstverstärkungseffekte der Hotspotbildung darstellen. Auch hier sind jedoch die damit gekoppelten Folgen abzuwägen, da ein ungleichmäßiger Verschleiß in radialer Richtung einen entscheidenden Einfluss auf die Flächenpressungsverteilung bei Folgebremungen hat.

Die Beeinflussung des Hotspotbildungsprozesses durch Variation von Bremsbelagzusammensetzungen stellt ein komplexes, jedoch aus Praxisbeobachtungen viel versprechendes Themengebiet dar. Denkbar ist die Beeinflussung der Anpassung des Bremsbelages an topologischen Bremsscheibenungleichförmigkeiten bzw. der Auswirkungen der

Interaktionen im Kontaktbereich durch dynamische Belagsteifigkeit und -dämpfungseigenschaften sowie durch die Eigenschaften der sich im Reibprozess bildenden Zwischenschicht.

Bei einer vollkommen gleichmäßigen Flächenpressungsverteilung in radialer Richtung wäre bei entsprechender Bremsbelagform und konstantem Reibbeiwert die Bildung von Hotbands ausgeschlossen. Zwar sind solche Idealbedingungen nicht in der Praxis umsetzbar, dennoch ist eine hohe Gleichmäßigkeit der Flächenpressungsverteilung erstrebenswert, um die der Hotspotbildung vorausgehenden Hotbands möglichst zu vermeiden. Dies ist maßgebend durch die Konstruktion des Bremssattels und die Homogenität des Bremsbelagmaterials beeinflussbar.

## **8.4 Offene Fragestellungen**

Wie bereits bei der Diskussion über die Übertragbarkeit der Ergebnisse geschildert, beruhen die vorgestellten Untersuchungen auf Experimenten mit einem einzigen Bremssystem. Deshalb besteht offensichtlicher Forschungsbedarf in der Überprüfung der Übertragbarkeit auf weitere Bremssysteme.

Die Mechanismen, die zur Bildung der festgestellten anfänglichen Welligkeit führen, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgestellt. Sowohl analytische Betrachtungen des Phänomens der Welligkeitsbildung als auch die numerische Simulation mittels FEM erwiesen sich auf Basis der eigenen bisherigen Erfahrungen als aussichtsreich.

Unter der Voraussetzung, dass die Übertragbarkeit der vorliegenden Erkenntnisse auf weitere Bremssysteme gegeben ist und deren Gültigkeitsbereich bestimmt ist, kann die Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Bestimmung der Neigung von Brems scheiben zur Welligkeitsbildung unter bestimm baren Bedingungen ein Werkzeug darstellen, das in einer frühen Phase der Entwicklung zur Vorbeugung des Auftretens von Hotspots und Heißrubbeln einen hohen Nutzen bieten wird.

## 9 Zusammenfassung

Die gegenwärtig hohen Komfortanforderungen bei Kraftfahrzeugen haben zur Folge, dass eine möglichst weitgehende Vermeidung von bremsinduzierten Schwingungen zu einem der wichtigsten Schwerpunkte bei der Entwicklung von Bremssystemen geworden ist. Unter dem Begriff Heißrubbeln verstehen sich bremsinduzierte, raddrehzahlabhängige Vibrationen, welche aufgrund von reversiblen, auf ungleichmäßige Temperaturverteilungen auf den Bremsscheibenreibflächen zurückzuführenden Verformungen hervorgerufen werden. Die Temperaturschwankungen erscheinen in Form von lokalisierten Hotspots, die eine regelmäßige Anordnung in Umfangsrichtung der Bremsscheibenreibringe aufweisen. Die komfortbeeinträchtigenden Folgen von Heißrubbeln sind Lenkraddreh-schwingungen, Bremspedalpulsationen, Karoserieschwingungen und Dröhngeräusche.

Es sind mehrere Modellvorstellungen zur Entstehung von Hotspots vorhanden, zu den jedoch jeweils keine Falsifikationsmethode bekannt ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Prüfstandsversuche zur Bestimmung der Ursachen-Wirkungs-Kette der Entstehung mit einem serienrepräsentativen Bremssystem durchgeführt. Für die Auswertung wurden je nach Untersuchungszweck die Temperaturverteilung auf den Bremsscheibenreibflächen, die Reibflächentopografie, das Bremsmoment sowie der Bremsdruck für jede einzelne Umdrehung des Bremsvorgangs sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich analysiert. Ferner wurden die Reproduzierbarkeit der Hotspotentstehung und die Einflüsse von Betriebsparametern sowie Eigenschaften von Bremsenkomponenten untersucht.

Die Versuchsergebnisse zeigen einerseits, dass der Entstehungsprozess von Hotspots von keiner der bekannten Modellvorstellungen erklärt wird. Andererseits lieferten die Untersuchungen die Schlüsselerkenntnis, dass die Hotspotbildung durch eine wellenförmige Verformung der Bremsscheibe initiiert wird. Diese Verformung wird vor der Hotspotentstehung bei verschiedenen Parametervariationen festgestellt und kann auch durch rein thermische Belastung bei annähernd konstanter Bremsscheibenoberflächentemperatur hervorgerufen werden. Die Erkenntnis über den Entstehungsprozess der Hotspotbildung gibt eine klare Richtung für weiterführende Forschung und deren Nutzung bietet ein hohes Potential zur Reduzierung bzw. Vermeidung des Vorkommens von Heißrubbeln in Scheibenbremsen.

---

## Literaturverzeichnis

Abdelhamid, Mohamed K.: [Brake Judder: Case Studies]

Brake Judder Analysis: Case Studies;

Noise and Vibration Conference, SAE 972027, 1997

Anderson A., Knapp R.: [Hot Spotting in Automotive Friction Systems]

Hot Spotting in Automotive Friction Systems;

Wear, 135, 1990, S. 319-337

Amador: [Friction and Braking]

Flynn; Ward; Friction and Braking, erschienen in Rensselaer, Bericht, 2004

Augsburg, Klaus: [Rubbilverhalten von Scheibenbremsen]

Brunner, Horst; Grochowicz, Jaroslaw: Untersuchungen zum Rubbilverhalten von

Pkw-Schwimmsattelbremsen; ATZ Band 101, 1999, S.22-30

Barber, J. R.: [Thermoelastic Instabilities]

Thermoelastic Instabilities in the Sliding of Conforming Solids.

In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences (1934-1990) 312 (1969) Nr. 1510, S.381-394

Bittner, Christoph: [Reduzierung des Bremsrubbels]

Reduzierung des Bremsrubbels bei Kraftfahrzeugen

durch Optimierung der Fahrwerkslagerung, Dissertation, TU München, 2006

Börjesson, M.: [Friction films in automotive brakes]

Eriksson, P.; Kuylenstierna, C.; Nilsson, P.H.; Hermansson, T.: The role of friction films in automotive brakes subjected to low contact forces; C444/026/93, IMechE, 1993

Breuer, Bert: [Bremsenerregte Schwingungen ]

Engel, Hans Georg; Neuere Erkenntnisse über bremsenerregte Schwingungen;

Vortrag auf dem XIV.  $\mu$ -Symposium, 1993

Breuer, Bert: [Bremsenhandbuch]

Bill, Karlheinz H.: Bremsenhandbuch, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik; 3. Auflage, ATZ/MTZ-Fachbuch, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag; Wiesbaden, 2006

Brooks, P.C.: [A Study of Disk Brake Judder]

A Study of Disk Brake Judder Using a Fully Coupled Thermo-Mechanical Finite Element Model; FISITA-Paper; Beijing, 1994

Choi-Ju-Hoon, In Lee: [transient thermoelastic behaviours in disk brakes]

Finite element analysis of transient thermoelastic behaviours in disk brakes; Wear, 2004

Dausend, Uwe:

Potenzial der Selbstverstärkung und einer nicht konstanten Getriebekennung zur Verminderung der Leistungs- und Energieaufnahme einer elektronischen Radbremse; VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 621, Düsseldorf 2006

De Vries, Alexander: [The Brake Judder Phenomenon]

Wagner, Mark: The Brake Judder Phenomenon; International Congress and Exposition, in: Detroit 24.-28.2.1992, Warrendale, USA, SAE 920554, 1992, S.25-33

Engel, Hans Georg: [System approach to brake judder]

Hassiotis, Vasilis; Tiemann, Rüdiger; System approach to brake judder; XXV FISITA Congress, Automobile in Harmony with Human Society, SAE Paper 945041; 1994

Engel, H. G.: [Untersuchung von Bremsenrubbeln ]

Schröder, F.; Hassiotis, V.; Tiemann, R.: Systemansatz zur Untersuchung von Bremsenrubbeln unter Berücksichtigung der Fahrerwahrnehmung; System approach to brake judder considering driver's perception; VDI Berichte Nr. 1189; 1995; S.241-273

Engel, Hans Georg: [Bremseregte Lenkunruhe]

Systemansatz zur Untersuchung von Wahrnehmungen, Übertragung und Anregung bremseregter Lenkunruhen in PKW; Dissertation, TU Darmstadt, 1998

Fieldhouse, John D.: [Investigation of Hot Judder]

Beveridge, Carl: An Experimental Investigation of Hot Judder;  
SAE International 2001-01-3135, 2001; S.1-10

Fieldhouse, John D.: [Experimental Observations of Hot Judder]

Experimental Observations of Hot Judder; FISITA-Paper; Helsinki, 2002

Gassmann, Stefan: [Excitation and Transfer Mechanism of Brake Judder]

Engel, Hans Georg; Excitation and Transfer Mechanism of Brake Judder;  
7<sup>th</sup> International Pacific Conference and Exposition on Automotive Engineering,  
SAE Paper 931880; 1993

Grochowicz, Jaroslaw: [Bremsdruck- und Bremsmomentschwankungen]

Experimentelle und rechnerische Untersuchung zu Bremsdruck- und  
Bremsmomentschwankungen; Technische Universität Dresden, 1995

Haig, M. J.: [Vehicle judder under dynamic braking ]

Vehicle judder under dynamic braking caused by disc thickness variation;  
IMechE, C444/022/93; 1993

Hartsock, Dale L.: [Effect of pad/caliper stiffness]

Fash, James W.: Effect of pad/caliper stiffness, pad thickness, and pad length on  
thermoelastic instability in disk brakes. Einflüsse auf die thermoelastische Stabilität  
von Brems scheiben; Journal of Tribology, Volume 122, ASME, 2000, S.511-518

Inoue, H.: [Analysis of brake judder]

Analysis of brake judder caused by thermal deformation of brake disc rotors;  
FISITA 865131, 1986

Jacobsson, Helena: [High Speed Disc Brake Judder]:

High Speed Disc Brake Judder-The Influence Of Passing Through Critical Speed;  
Proceedings, EUROMECH-2nd Nonlinear Oscillation Conference, Prague, 1996

Jacobsson, Helena: [Brake Judder]

Brake Judder; Dissertation, Machine and Vehicle Systems,  
Chalmers University of Technology; Göteborg, 2001

Jacobsson, Helena: [Brake Judder Phenomenon]

The Brake Judder Phenomenon, Classification and Problem Approach, 2001

Jacobsson, Helena: [Disk brake judder]

Aspects of disc brake judder; PIMED 217(2003)6; Göteborg, 2003

Jacobsson, Helena: [Disc thickness variation]

Disk brake judder considering instantaneous disc thickness and spatial friction variation;

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Göteborg, 2003

Kao, T.K.: [Predictive techniques to study thermo-elastic instability in brakes]

The application of predictive techniques to study thermo-elastic instability in brakes;  
12<sup>th</sup> Annual Brake Colloquium and Engineering Display, Atlanta, Georgia;  
SAE Paper 942087, 1994

Kao, T. K.: [Disc hot spotting and thermal judder]

Richmond, J.W.; Douarre, A. : Brake disc hot spotting and thermal judder:  
an experimental and finite element study;

International Journal of Vehicle Design, Volume 23, Nos. ¾, 2000, S.276-296

Keiner, Werner: [Hochgekoelter Grauguss als Werkstoff für Bremsscheiben]

Werning, Horst:

Hochgekoelter Grauguss GG-15 HC - Idealer Werkstoff für Bremsscheiben und  
Bremstrommeln; „konstruieren + giessen“, Heft 4/90, VDI-Verlag; Düsseldorf, 1990

Kubota, Masahiro: [High speed brake judder]

Suenaga, Tomihiro; Doi, Kazuhiro: A Study of the Mechanism Causing  
High-Speed Brake Judder; SAE 980594, 1998, S.133-137

Lampic, M.: [Bremsrubbeln aus Sicht des Bremsscheibenherstellers]

Das Problem des Bremsrubbelns aus der Sicht des Bremsscheibenherstellers;  
Dresden Bremsenkolloquium, 1995, S.64-66

Lee, Kwangjin: [Frictionally excited thermoelastic instability ]

Barber, J.R.: Frictionally excited thermoelastic instability in automotive disk  
brakes. In: ASME Journal of Tribology 115 (1993) S.607-614

Lee, Kwangjin: [Conditions of Frictional Contact in Disk Brakes]

Dinwiddie, Ralph B.: Conditions of Frictional Contact in Disk Brakes and their Effects  
on Brake Judder; Society of Automotive Engineers, Inc., SAE 980598, 1998

Litos, P.: [Measuring system for research of thermoelastic instabilities]

The measuring system for the experimental research of thermo-mechanical instabilities  
of disc brakes; Braking 2006; 2006

Little, Edward: [A Dynamometer Investigation of Thermal Judder]

Kao, Tseng-Kuan; Ferdani, Philip; Hodges, Timothy:  
A Dynamometer Investigation of Thermal Judder; SAE-Paper 982252, 1998, S.81-89

Little, Edward: [Influence of material properties on sliding contact]

Kao, Tseng-Kuan; Ferdani, Philip; Hodges, Timothy:  
Influence of material properties on sliding contact braking applications, 1998

Nechtelberger, Erich: [Gußeisenwerkstoffe]

Gußeisenwerkstoffe: Eigenschaften unlegierter u. niedriglegierter Gusseisen mit  
Lamellengraphit, Kugelgraphit, Vermiculargraphit mit Temperaturbereich bis 500°C;  
1. Auflage, Teil 1: Textband, Fachverlag Schiele & Schön GmbH; Berlin, 1977

Panier: [Investigation of hot spots]

Dufrenoy; Weichert:  
An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes; Wear 256, 2004

Panier, S.: [Progressive Waviness Distortion]

Dufrenoy, P.; Brunel, J. F.; Weichert, D.: Progressive Waviness Distortion:  
A new approach of hot spotting in disc brakes.

In: Journal of Thermal Stresses 28 (2004) Nr. 1, S.47-62

Popper, Karl: [Logik der Forschung]

Logik der Forschung, Hrsg. von Herbert Keuth, Tübingen, 2005

Rinsdorf, Andreas: [Evaluation of Energy Input]

Evaluation of the Energy Input in Pad and Disc During a Brake Application;  
SAE 942086, 1994

Sardá, A.: [Hot Spots and Thermal Judder]

Haag, M.; Winner, H.; Semsch, M.: Experimental Investigation of Hot Spots and  
Thermal Judder. In: SAE Paper (2008) 08BC-0060

Schittenhelm, Helmut: [Rubbelrobustes Bremsendesign]

Rubbelrobustes Bremsendesign - ein integraler Bestandteil des robusten  
Fahrwerksdesigns; BMWF-Bericht, Förderkennzeichen 13N7177/8; Forschung und  
Technologie, Fahrzeugsystemdynamik, Daimler Chrysler AG; Stuttgart, 2000

Schumann, M.: [Analysemethode zu Bremsscheibenverschleiß]

Analysemethode zur Beurteilung des ungleichförmigen  
Bremsscheibenverschleißes an Pkw-Scheibenbremsen. In: Fortschritt Berichte-VDI,  
Reihe 12 (Verkehrstechnik Fahrzeugtechnik), Nr. 635 (2006)

Steffen, Torsten: [Hotspotbildung]

Untersuchung der Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben;  
VDI Fortschritt-Berichte, Reihen 12 Nr. 345, VDI Verlag; Düsseldorf, 1998

Steffen, T. : [Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben ]

Bruns R., : Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben.  
In: ATZ. Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1998) Nr. 6, S.408-414

Steffen, Torsten: [Hot Spot Simulation]

Hot Spot Simulation; erschienen in Braking, 2006

Stringham, W.: [Brake roughness]

Brake roughness – disk torque variation, rotor distortion and vehicle response

Jank, P.; Pfeifer, J.; Wang, A.: SAE-Paper 930803; 1993

Suryatama, D.: [Hot Spots Simulation]

Stewart, D.J.; Meyland, S.C.; Hou, L.J.: Contact Mechanics Simulation for Hot Spots

Investigation; SAE 2001-01-0035, 2001, S.35-46

Thuresson: [Material properties on sliding contact]

Influence of material properties on sliding contact braking applications; Wear 257, 2004

Yi, Yun-Bo: [Thermoelastic Instabilities]

Barber; Hartsock: Thermoelastic Instabilities in Automotive Disk Brakes –

Finite Element Analysis and Experimental Verification, 2003

## Lebenslauf

Dipl.-Ing. Angelo Sardá  
Heidelberger Landstraße 51  
64297 Darmstadt

- Persönliche Daten

Geburtsdatum: 15. September 1973  
Geburtsort Ituporanga - Brasilien

- Berufliche Tätigkeit

2003 – 2008 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet  
Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt

- Universitäre Ausbildung

2003 Abschluss als Dipl.-Ing.,  
Diplomarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik

1996 – 2003 Allgemeiner Maschinenbau, TU Darmstadt

1992 – 2005 Engenharia Mecânica, UDESC, Brasilien

- Schulische Ausbildung

1990 Hochschulreife (Colégio Dom Bosco, Rio do Sul –  
Brasilien)