

Wirkungskette der Entstehung von Hotspots und Heißrubbeln in Scheibenbremsen

A. Sardá, G. Seipel, H. Winner

Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

M. Semsch

Continental AG, Chassis and Safety Division

Zusammenfassung

Heißrubbeln stellt eine Bremskomfortbeeinträchtigung dar, die auf das Auftreten von Hitze-
flecken, so genannten Hotspots, bei Bremsungen aus hohen Geschwindigkeiten zurückzuführen
ist und durch eine temporäre Brems Scheibenverformung über die Bremskreise und das
Fahrwerk Vibrationen im Fahrzeug hervorruft. Dies wird aufgrund der gegenwärtigen Quali-
tätsstandards der Fahrzeug- und Bremsenhersteller nicht toleriert und ist mit erheblichen
Bemühungen zur Minimierung bzw. Vermeidung verbunden. Zwar gibt es eine Reihe von Mo-
dellvorstellungen, die aber, wie sich im Rahmen dieser Untersuchung gezeigt hat, experimen-
telle kaum überprüft wurden. Mit Versuchen an einem Schwungmassenprüfstand konnten ei-
nerseits einige Modellvorstellungen falsifiziert werden und andererseits entdeckt werden,
dass vor Auftreten periodischer Temperaturschwankungen eine geometrische Wellung der
Scheibe zu beobachten ist, als deren Folge sich eine dazu kohärenten Hotspotverteilung ent-
wickelt. Diese Ergebnisse sowie weitere experimentelle Beobachtungen werden in diesem
Artikel gezeigt, wodurch nun eine experimentell abgesicherte Grundlage für die Entste-
hungsmechanismen gegeben ist. Weiterhin wird auf neue Untersuchungen mittels Finiter E-
lemente Methode und eines eigens konstruierten Prüfstand zur rein thermischen Belastung
der Brems Scheibe verwiesen.

1 Einleitung

Beim Bremsenrubbeln handelt es sich um erzwungene, geschwindigkeitsabhängige Schwin-
gungen. Es wird zwischen Kalt- und Heißrubbeln unterschieden. Kaltrubbeln wird durch auf

fertigungsbedingte bzw. durch auf ungleichmäßigen Verschleiß zurückzuführende permanente Brems Scheibendickenschwankungen hervorgerufen. Umfassende Untersuchungen zu Kalt-rubbeln sind in [7] zu finden.

Heißrubbeln entsteht aufgrund reversibler Brems Scheibendeformationen, die mit einer un-gleichmäßigen Erwärmung der Brems Scheibe gekoppelt sind. Bei Abbremsungen aus hohen Geschwindigkeiten mit niedrigem Bremsdruck bilden sich auf der Scheibenreibfläche in Um-fangsrichtung periodische Hitzeflecken, so genannte Hotspots. Bei den in Rahmen dieser Ar-beit durchgeführten Untersuchungen mit verschiedenen Bremssystemen variierte die Anzahl der aufgetretenen Hotspots zwischen 8 und 20. Da Die Rubbelfrequenz üblicherweise durch Bezug auf die Raddrehzahl ausgedrückt wird, entstanden dadurch jeweils entsprechend Vib-rationen der 8. bis 20. Ordnung. Temperaturunterschiede von über 300°C innerhalb der Hot-spotwellenlängen wurden oft gemessen.

Die mit einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung gekoppelte Brems Scheibenverformung beeinflusst die Reibbedingungen zwischen Bremsbelägen und Brems Scheibe. Die lokalen To-pographie-Schwankungen der rotierenden Brems Scheibe rufen Schwankungen der Flächen-pressung in der Kontaktfläche und somit der Spannkraft hervor. Zusätzlich kann der Reibbei-wert zwischen Scheibe und Belag durch die inhomogene Flächenpressungs- und Temperatur-verteilung Schwankungen unterliegen. Es entstehen Umfangskraft- und somit Bremsmoment-schwankungen (BTV – Brake Torque Variation). BTV bewirkt Bremskraftschwankungen an der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn. Diese Anregung kann einerseits durch die Übertragung über das Lenksystem zu Lenkraddrehschwingungen, andererseits durch die Ü-bertragung über das Fahrwerk an die Karosserie zu Sitzvibrationen und Geräuscentwicklung führen. Die Übertragungseigenschaften von Lenksystem und Fahrwerk beeinflussen maßgeb-lich die Wahrnehmbarkeit der Vibrationen durch den Fahrer und Fahrzeuginsassen [2]. Die Unebenheit der Brems Scheibenoberfläche induziert außerdem eine Fußpunkterregung des Bremsbelags, die ein Zusammendrücken der Bremsflüssigkeitssäule zur Folge hat. Diese Vib-rationen werden bei gegebener hydraulischer und mechanischer Verbindung über Bremslei-tungen und Betätigungseinrichtung bis hin zum Bremspedal übertragen, so dass der Fahrer zusätzlich Bremspedalpulsationen wahrnehmen kann.

Bei den gegenwärtigen Qualitätsstandards im Bezug auf NVH (Noise and Vibration Harshness) in der Fahrzeugtechnik wird das Auftreten der oben beschrieben Vibrationen nicht toleriert. Zur Vermeidung von Heißrubbeln und somit zur Erfüllung der diesbezüglich hohen Qualitäts-ansprüche werden deshalb während des Entwicklungsprozesses zahlreiche aufwändige Prü-

fungen durchgeführt, die in erheblichem Maße monetäre und zeitliche Ressourcen beanspruchen.

Seit mehr als 40 Jahren wird das Phänomen der Hotspotbildung bei Reibungsvorgängen und der dadurch verursachten Vibrationen wissenschaftlich untersucht. In der Literatur existieren verschiedene Modellvorstellungen zur Erklärung der Ursachen für die Entstehung von Hotspots. Trotz der erheblichen Fortschritte der vergangenen Jahrzehnte bei der Ermittlung von Erscheinungsformen und Einflussparametern, ist die Frage der relevanten Mechanismen, die zur Bildung von Hotspots führen, offen. Insbesondere kann dieser Umstand auf das Fehlen einer systematischen experimentellen Untersuchung zur Hotspotentstehung zurückgeführt werden. Eine solche Untersuchung stand daher im Mittelpunkt eines Forschungsprojektes des Fachgebiets Fahrzeugtechnik (FZD) der TU Darmstadt und der Continental AG (Chassis and Safety Division).

Ausgehend von einer Recherche der vorhandenen Modellvorstellungen zum Thema Heißrüb-
beln wurden unterschiedliche Fragestellungen abgeleitet. Diese dienen als Grundlage für die durchgeführten Experimente.

2 Bestehende Modellvorstellungen

Nach Barber [1] ist die Ursache in der thermomechanischen Wechselwirkung zwischen Bremsbelag und Reibring zu sehen, die ab einer bestimmten kritischen Reibgeschwindigkeit instabil wird. Der maßgebliche Mechanismus hinter der Hotspotentstehung wird daher auch als thermoelastische Instabilität (TEI) bezeichnet. Nach dieser Modellvorstellung verteilt sich die Flächenpressung zwischen den Reibpartnern nicht gleichmäßig, sondern konzentriert sich aufgrund von Störungen in der Kontaktfläche auf einzelne Bereiche. Durch die damit lokal erhöhte Flächenpressung kommt es an diesen Stellen zu einem erhöhten reibungsinduzierten Wärmeeintrag, was wiederum zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung auf dem Reibring führt. Aufgrund der damit verbundenen ungleichmäßigen Wärmedehnung, wachsen die Kontaktstellen in höherem Maße an, wodurch die örtliche Konzentration der Flächenpressung weiter verstärkt wird. Gleichzeitig nimmt jedoch auch der Verschleiß dieser Stellen zu, wodurch sie sich wieder zurückbilden, bis benachbarte Stellen in Kontakt mit dem Reibpartner gelangen und sich dort der Vorgang wiederholt. Abhängig davon, wie das Verhältnis von Wärmedehnung zu Verschleiß ist, kann es aber auch zu einem weiteren Wachstum der anfänglichen Störung kommen und der Vorgang wird instabil. Lee und Barber [4] haben auf dieser Basis an einem analytischen Ersatzmodell die Bedingungen untersucht, unter denen eine sinusförmige Störung in der Flächenpressungsverteilung exponentiell anwachsen kann. Dies

fürte auf ein Differentialgleichungsproblem, dessen Eigenwerte für die verschiedenen Welligkeitsordnungen die kritische Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Systemeigenschaften darstellen. Die zugehörigen Eigenformen ergeben die Verwellungen der Bremsscheibe, deren Welligkeitsordnung der Anzahl der Hotspots entspricht. Bei der analytischen Betrachtung hat sich weiterhin gezeigt, dass nicht beliebige Störungen zu thermoelastischen Instabilitäten führen können, sondern nur solche, deren Wellenlänge (= Abstand der entstehenden Hotspotzentren) nicht größer als die Belaglänge in Umfangsrichtung ist.

Nach Kao [2] wird auch angenommen, dass die Flächenpressungsverteilung zwischen der Bremsscheibe und den Belägen nicht gleichmäßig verteilt ist. Durch die einhergehende ungleichmäßige Wärmedehnung der Scheibe auf den Reibringen entstehen thermisch bedingte Scheibendickenschwankungen (DTV). Diese führen in Umfangsrichtung zu phasenversetzten Temperaturspitzen. Die daraus resultierende Spannungsverteilung in der Bremsscheibe hat eine Verwölbung bzw. Beulen zur Folge, was die Temperaturspitzen weiter verstärkt und so zu deutlichen Hotspots anwachsen lässt. Dies wird auch als instabiles thermoelastisches Beulen bezeichnet.

Eine andere Theorie vertritt Panier [5] und bezeichnet den Entstehungsmechanismus als progressive Welligkeitsverformung (engl. „Progressive Waviness Distortion“, PWD), die sich in drei Schritten vollzieht. Im ersten Schritt kommt es aufgrund der Asymmetrie der Scheibe durch die Topfanbindung zu einer Temperaturverteilung in axialer Richtung, die nicht symmetrisch zur Scheibenmittelebene ist. Zusätzlich stellt sich zwischen Belag und Reibring gemäß der Druckverteilung ein Temperaturgradient in Umfangsrichtung ein, der zur Belagmitte gerichtet ist. Dies ruft thermisch bedingte Biegemomente im Reibring hervor, was zu einer instationären Verwellung zweiter Ordnung führt. Sind die thermischen Spannungen groß genug, kann es im zweiten Schritt zu plastischen Verformungen kommen und die Welligkeit zweiter Ordnung wird stationär. Auf den jeweils zwei gegenphasig angeordneten Wellenbergen je Reibring kommt es dort zur lokalen Erhöhung der Flächenpressung und damit zu einem Anstieg der lokalen Temperatur. Die sich daraus wiederum ergebenden Biegemomente erzeugen dort lokale Verwellungen zweiter Ordnung, was global zu sechs Wellenbergen je Reibring, und damit sechs Hotspots führt. Im dritten und letzten Schritt vollzieht sich keine weitere Änderung der Welligkeitsordnung und es kommt durch plastische Verformungen zu einem stabilen Zustand der Scheibe mit sechs stationären Hotspots.

Nach Steffen [8] liegt die Ursache der Hotspotentstehung in der Wechselwirkung der verschiedenen Größen im Scheibeninnern sowie auf der Reibringoberfläche, die eine geschlossene kausale Kette bilden: Der anliegende Bremsdruck wandelt die kinetische Energie des Fahr-

zeugs in Reibarbeit um, welche zu großen Teilen als Wärmestrom in den Reibring geleitet wird. Dies führt zu einer Erhöhung der Scheibentemperatur, was mit einer Zunahme der Wärmedehnung verbunden ist. Durch die dynamische Ausdehnung der Scheibe kommt es aufgrund der Massenträgheit des Belags wiederum zu einem leicht erhöhten Bremsdruck, wodurch die kausale Kette geschlossen wird. Der Bremsbelag wird für die Modellvorstellung als so gelagert angenommen, dass eine axiale Verschiebung des gesamten Belages nicht möglich ist (unbeweglicher Kolben) und eine Verformung der Reibringoberfläche eine Kompression des Belagmaterials zur Folge hat, welches durch Feder-Dämpfer-Elemente nachgebildet ist. Tritt nun eine Störung in der Kette auf, z.B. durch eine lokale Verformung der Reibringoberfläche, so führen Unregelmäßigkeiten in einem Glied der Kette zu Unregelmäßigkeiten in den anderen Gliedern. Je nachdem, wie groß die Übertragung einer Störung ist – abhängig von den Systemeigenschaften – kann diese entweder wieder abklingen oder weiter zunehmen. Eine einmal entstandene Topologieerhöhung wird fortwährend stärker erwärmt als die umliegenden Bereiche. Dadurch entstehen Druckschwankungen in Umfangsrichtung, die zur Hotspotentstehung führen. Eine andere Hypothese wird in [9] vorgestellt: ein lokaler Temperatursprung führt zur Bildung eines „Hügels“. Dieser führt wiederum zur Bildung zweier Hügel auf der Gegenseite, welche einen systembedingten Abstand zueinander haben. Es wird davon ausgegangen, dass sich auf den so generierten Hügeln auf der Gegenseite wieder erhöhte Temperaturen ergeben. Die Störung setzt sich weiter fort, es bilden sich fortwährend weitere Hügel und somit Hotspots.

In einer FEM-Studie von Suryatama [10] wurde der Einfluss der Radbolzenkräfte auf die Hotspotentstehung untersucht. Ungleichmäßig angezogene Radbolzen führen zu montagebedingtem lateralem Scheibenschlag, was langfristig durch die damit einhergehende Taumelbewegung der Scheibe zu ungleichmäßigem Verschleiß und damit zu DTV führt. An den dickeren Stellen kommt es wiederum zu höheren lokalen Drücken und damit letztlich zu höheren Temperaturen. Die Ordnung der durch Scheibenschlag hervorgerufenen DTV entspricht allerdings der Ordnung des Scheibenschlags und ist damit geringer als die typische Ordnung von Hotspots. Ein stärkerer Einfluss als durch den Scheibenschlag wird daher in den durch die Radbolzen über die Anbindung auf die Reibringe übertragenen Spannungen gesehen, welche eine geringfügige Verwellung hervorrufen. Durch die thermomechanischen Wechselwirkungen mit dem Belag kommt es zu einem Wachstum dieser Verwellung und zur Entstehung von Hotspots, deren Ordnung der der Verwellung entspricht, für die nur das Ein- oder Vielfache der Radbolzenzahl in Frage kommt.

Die obige Beschreibung von unterschiedlichen Modellvorstellungen verdeutlicht die Vielfältigkeit der vermuteten Ursachen für die Entstehung von Hotspots auf der Bremsscheibenoberfläche während des Bremsvorgangs.

Es werden Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen vermisst, die einen belastbaren Nachweis über die tatsächlichen Mechanismen der Hotspotbildung führen. Daraus lässt sich der Bedarf an experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der Ursache für die Hotspotentstehung ableiten.

3 Versuch und Versuchswerkzeuge

Die experimentellen Untersuchungen zur Entstehung von Hotspots wurden in Zusammenarbeit mit der *Continental AG* an einem Schwungmassenprüfstand und einem eigens konstruierten Prüfstand zur Untersuchung des Einflusses der Bremsscheibenverformung bei rein thermischer Belastung durchgeführt. Dabei wurden die folgenden Anforderungen an die Prüfbedingungen gestellt:

- Einsatz von serienrepräsentativen Komponenten
- Messbarkeit, Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit der Anfangs- und Betriebsbedingungen
- Messung der Bremsscheibenverformung, Temperaturverteilung auf beiden Bremsscheibenoberflächen, Bremsdruck, Bremsmoment.
- Realitätsnahe Betriebsbedingungen (Geschwindigkeitsbereich, Fahrzeugmasse, Luftanströmung, Anbindung des Bremssystems an die Radnabe)

Bei dem verwendeten Bremssystem, bestehend aus Bremsscheibe, -belägen und -sattel, handelt es sich um eine Faustsattelbremse, die bei einem leistungsstarken SUV (Sports Utility Vehicle) serienmäßig an der Vorderachse verbaut wird. Die technischen Eckdaten der Bremsanlage sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Eckdaten des verwendeten Bremssystems

Satteltyp	Faustsattel
Scheibentyp	belüftet
Scheibenaußendurchmesser	390 mm
Scheibeninnendurchmesser	237 mm
Mittlerer geometrischer Reibradius	157 mm

Scheibendicke	36 mm
Bogenlänge der Beläge in Umfangsrichtung	variierend von 23° - 46°

3.1 Schwungmassenprüfstand

Bei den Bremsversuchen kam ein Schwungmassenprüfstand zum Einsatz, mit dem sowohl Stopp-, als auch Schleppbremsungen möglich sind. Prüfprogramme können dabei vollautomatisch ausgeführt werden, wobei Bremsdruck bzw. Bremsmoment als Regelgröße dient. Zur Simulation einer realitätsnahen Anströmung der Bremse ist die Prüfstandsbelüftung geschwindigkeitsabhängig. Für die verwendete Messtechnik ergeben sich besonders im Hinblick auf die Auflösung hohe Anforderungen: Bei einer simulierten Fahrzeuggeschwindigkeit von 160 km/h hat die Brems Scheibe eine Drehzahl von ca. 20 U/s. Die Umfangsgeschwindigkeit im mittleren Radius der Brems Scheibe beträgt dann 20 m/s bei einem mittleren Umfang von etwa 1000 mm. Nimmt man weiterhin eine maximale Anzahl an auftretenden Hotspots von 20 und 10 Messungen pro Wellenlänge an, so ergeben sich 200 Messungen pro Umdrehung und somit eine benötigte Auflösung von mindestens 4 kHz. Ähnliche Überlegungen wurden auch für die Messung der Topographie, des Bremsdrucks und des Bremsmoments angestellt. Nach diesen Anforderungen wurde die Messtechnik ausgewählt, deren wesentliche Komponenten und Eigenschaften nachfolgend aufgeführt sind:

- Sensoren (Abtastrate 10 kHz)
 - 10 kapazitive Wegsensoren
 - Bremsdrucksensor
 - Kraftmessdose
 - Drehzahlgeber
 - Temperatur-Schleifensensoren
 - 2 Infrarot-Pyrometer
 - Inkrementalgeber als Trigger
- Thermobildkamera
 - Echtzeitfähig
 - Konstante 256 Messungen pro Umdrehung, ca. 80 Radien pro Reibring
 - 32 Bit Farbtiefe
 - Bildwiederholrate von 13000 Hz
 - Temperaturbereich von -40°C bis 900°C
 - Auflösung von 0,02 K

Abbildung 1a zeigt die Innenansicht der Prüfkabine des Schwungmassenprüfstands mit dem Versuchsaufbau: Zu- (1) und Abluft (2), kapazitive Wegsensoren (3), Achsschenkel (4), Ther-

moschleifsensor (5), Bremsdrucksensor (6), Momentenmesswelle (7), Bremssystem (8), Pyrometer (9) und Druckdrossel (10). Die Thermobildkamera ist senkrecht zur Rotationsachse der Scheibe ausgerichtet (Abbildung 1b). Mittels zweier Umlenkspiegel (kleines Bild, oben) können beide Reibringe simultan aufgenommen werden. Die so entstandenen Thermobildaufnahmen werden in der Kamerasoftware zur Visualisierung wieder zu Ringen zusammengesetzt (kleines Bild, unten). Je Reibring sind fünf kapazitive Wegsensoren äquidistant in radialer Richtung angeordnet (Abbildung 1c, oben). Aus den Messdaten kann so eine dreidimensionale Ansicht der Scheibentopographie erzeugt werden (Abbildung 1c, unten).

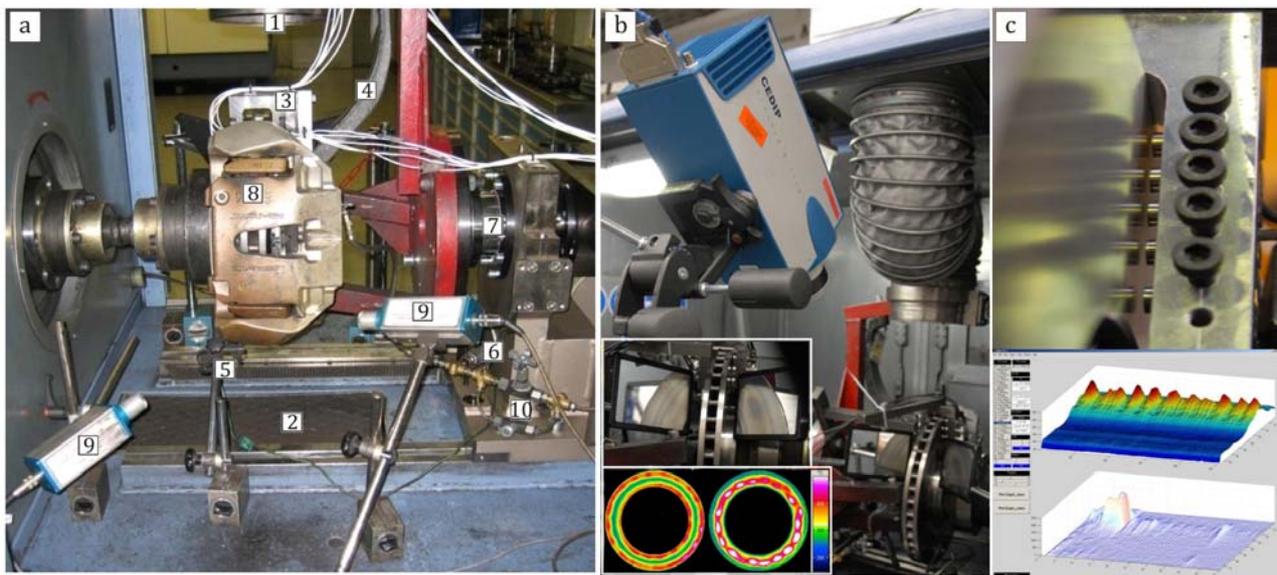


Abbildung 1: Innenansicht der Prüfkabine mit dem Versuchsaufbau (a), Ausrichtung der Thermobildkamera und der Spiegel zur Aufnahme beider Reibringe (b), Anordnung der kapazitiven Sensoren und Darstellung der Topographie in der Analysesoftware (c)

3.2 Messdatenauswertung

Zur Nachvollziehbarkeit des Entstehungsprozess von Hotspots anhand der Messgrößen wurden Auswertungsalgorithmen entwickelt, um für jede einzelne Umdrehung Temperaturverlauf, Brems Scheibentopographie und weitere Messgrößen zu ermitteln, sowie die Verläufe untereinander zuordnen und die Signale verarbeiten zu können. Dafür wurde ein eigenes Programm entwickelt, welches es erlaubt, aus den Daten der Thermobildkamera und der kapazitiven Wegsensoren die Temperatur und die Topographie der Scheibenoberfläche für jeden Reibring separat pro Umdrehung dreidimensional oder durch Auswahl der einzelnen Sensoren zweidimensional für einen bestimmten Radius darzustellen. Zusätzlich bietet das Programm die Funktion einer Fourier-Transformation der Messdaten.

4 Ergebnisse

4.1 Erscheinungsbild von Hotspots

Eine annähernd gleichmäßige Verteilung der Hotspots in Umfangsrichtung wurde bei den durchgeführten Versuchen grundsätzlich festgestellt und somit die bisherige Beschreibung in der Literatur bestätigt. Bei Bremsungen mit dem verwendeten Basis-Bremssystem für die Hauptversuche bildeten sich zwischen 9 und 12 Hotspots. Die Temperaturschwankungen zwischen den Maxima der Hotspots und den benachbarten Bereichen betragen oft über 300°C, vereinzelt sogar über 400° C. Während sich meistens auf einem der Reibringe ein deutlich ausgeprägter Hotspotring in einem etwa mittigen Radius bildete, entstanden auf dem gegenüber liegenden Reibring zwei weniger ausgeprägten Hotspotringe, die tendenziell auf jeweils innere und äußere Radien zu finden waren, wie die Infrarotaufnahme in Abbildung 2 verdeutlicht.

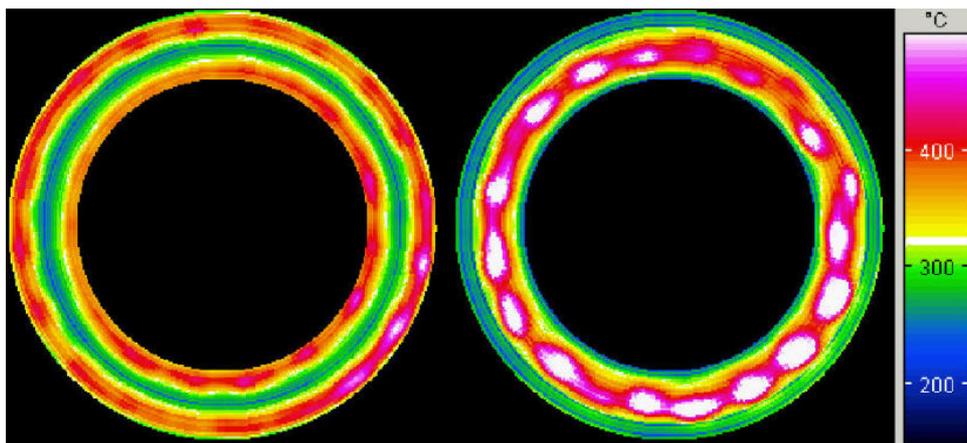


Abbildung 2: Typisches Erscheinungsbild der Hotspots: Ein intensiver Hotspotring auf einem Reibring und zwei weniger ausgeprägte auf der Gegenseite

Ebenso bestätigt wird die oftmals in der Literatur beschriebene Aussage über die alternierenden Positionen der Hotspots auf den Reibringen der Bremsscheibe. Abbildung 3 zeigt die Thermobildaufnahme der abgewickelten Reibringe für eine Umdrehung bei einer Stoppbremung aus 210 km/h mit einem Bremsmoment von 310 Nm. Bei den Positionen der Temperaturmaxima auf der Faustseite befinden sich tendenziell Temperaturminima auf der Kolbenseite und umgekehrt. Diese Beziehung dient als Nachweis der Kopplung zwischen der Hotspotbildung auf beiden Reibringen.

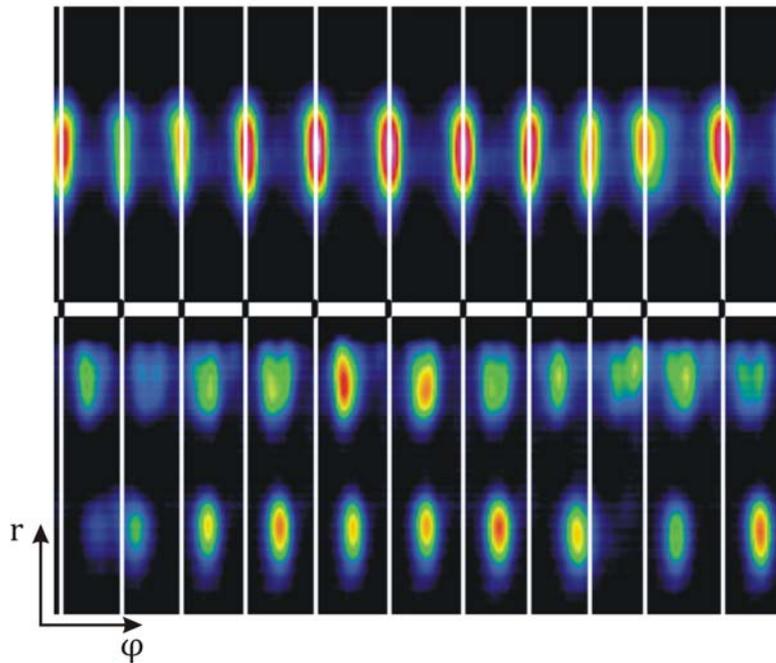


Abbildung 3: Alternierende Position der Hotspots auf beiden Reibringen während einer Bremsung (Stoppbremsung aus 210 km/h mit einem Bremsmoment von 310 Nm)

Es besteht außerdem eine offensichtliche Beziehung zwischen den Positionen der Hotspots bei Folgebremungen. Abbildung 4 zeigt die Temperaturverteilung bei sechs aufeinander folgenden Stoppbremsungen. Bei allen Versuchen betrug die Anfangstemperatur 70°C, die Anfangsgeschwindigkeit 210 km/h, das Bremsmoment 310 Nm. Die Bilder stellen die Temperatur bei einer Geschwindigkeit von 140 km/h dar.

Während bei der ersten Bremsung der mittig angeordnete ausgeprägte Hotspotring zu finden ist, befindet sich dieser bei der darauf folgenden Bremsbetätigung auf der Kolbenseite. Umgekehrt gilt es für die jeweils auf inneren und äußeren Radien angeordneten, weniger ausgeprägten Hotspotringe auf den entsprechend gegenüber liegende Reibringen. Bemerkenswert ist bei Vergleich zwischen der ersten und der zweiten Bremsungen außerdem, dass auf den jeweiligen Reibringen die Hotspotbildung auf alternierenden Positionen erfolgt, d.h. bei der Folgebremung entstehen Temperaturmaxima auf Positionen in Umfangsrichtung, bei den in der vorherigen Bremsung Temperaturminima vorhanden waren. Bei der dritten Bremsung bildeten sich jeweils zwei Hotspotringe auf beiden Reibringen, mit alternierenden Positionen in Umfangsrichtung innerhalb der jeweiligen Reibringe. Die beobachtete Anordnung der Hotspots bei den ersten drei aufeinander folgenden Bremsungen stellt einen Zyklus dar, der sich nun ab der 4. Bremsung wiederholt. Je nach Bremssystem wurde entweder die in Abbildung 4 dargestellte Reihenfolge oder eine reine Abwechslung der bei Bremsungen 1 und 2 (bzw. 4 und 5) beobachteten Hotspotanordnung festgestellt, also ohne dass sich zwei Hot-

spotringe gleichzeitig auch beide Seiten der Bremsscheibe bildeten. Bei Bremssystemen mit kleineren Bremsscheiben bildete sich auf beiden Reibringen jeweils ein mittig angeordneter Hotspotring.

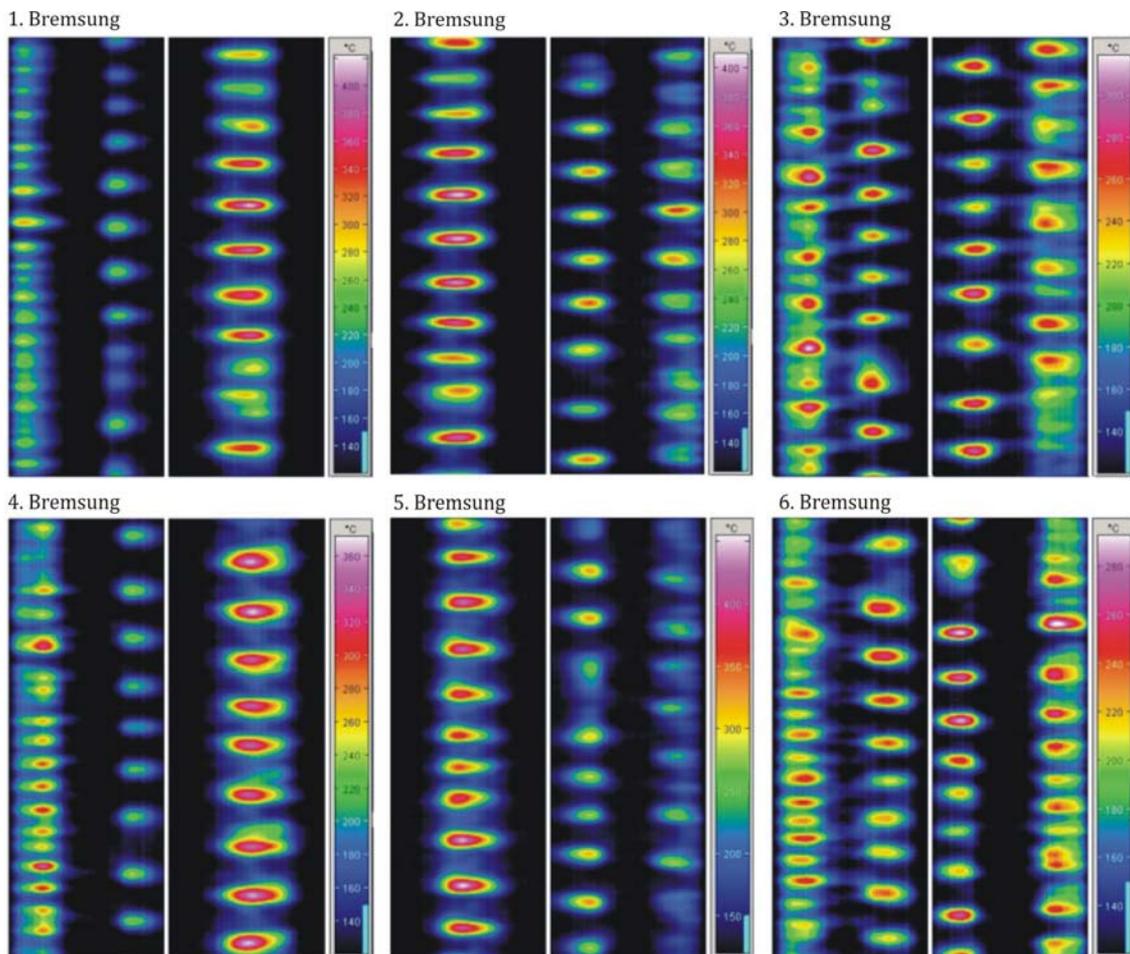


Abbildung 4: Hotspotbildung bei 6 aufeinanderfolgenden Bremsungen. Die Bilder zeigen jeweils die Temperaturverteilung auf der Kolben- (links) und der Faustseite (rechts)

Erfolgt zwischen den einzelnen Hochgeschwindigkeitsbremsungen die Durchführung eines so genannten Recovery-Programms (60 Betätigungen bei geringer Geschwindigkeit und mäßiger thermischer Bremsscheibenbeanspruchung), so findet das Alternieren der Bildung des mittig angeordneten ausgeprägten Hotspotrings bei Folgebremssungen zwischen Faust- und Kolben- seite nicht mehr statt. Stattdessen bildet sich jener Hotspotring grundsätzlich auf der Faust- seite, wobei jedoch der zyklische Positionswechsel in Umfangsrichtung weiterhin zu beobachten ist, wie in Abbildung 5 dargestellt.

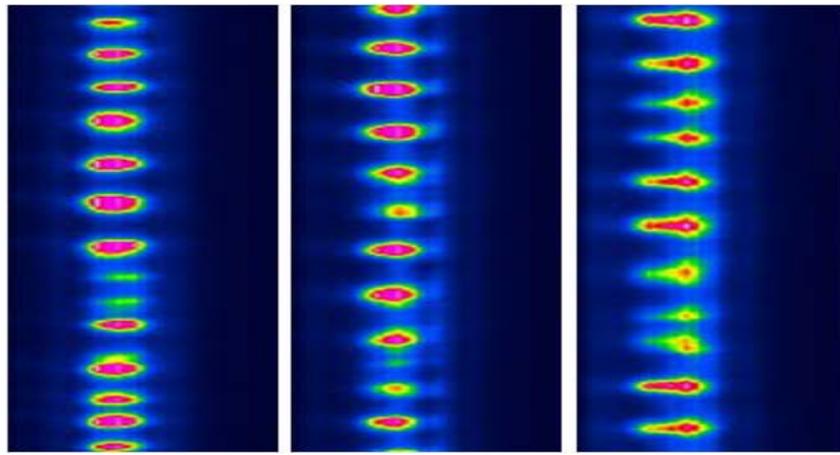


Abbildung 5: Hotspots auf der Faustseite bei drei aufeinanderfolgenden Bremsungen und Durchführung eines Recovery-Programms zwischen den Stopps.

Die Analyse der entsprechenden Messgrößen ermöglicht die Feststellung der Übereinstimmung der Ordnungen der Variationen von Temperatur, Bremsdruck und Bremsmoment. Außerdem wurden bei Versuchen mit mehreren Paarungen von Bremsbelägen und Brems scheiben aus jeweils gleichen Fertigungschargen eine bezogen auf Hotspotanzahl und Amplitude der Temperaturschwankungen gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse festgestellt (Mittlere Hotspotanzahl ± 1 sowie mittlere Amplitude der Temperaturschwankungen $\pm 15\%$) [6].

Im Rahmen der Arbeit wurde der Einfluss von verschiedenen Betriebsparametern und Eigenschaften von Bremskomponenten auf die Hotspotbildung untersucht. Abbildung 6 zeigt beispielhaft die auf die Temperaturverteilung bezogenen Ergebnisse bei Variation der Bremsbelagbogenlänge. Die ursprüngliche Bogenlänge von 46° wurde um 20% bzw. um 50% reduziert. Angewendet wurden verschiedene Bremsbeläge aus einer gleichen Fertigungscharge mit jeweils neuen Brems scheiben (pro Belaglänge drei Scheiben). Bei Schlepptbremsungen mit 200 km/h bzw. 160 km/h wurde mit allen Belagbogenlängen eine Hotspotanzahl zwischen 9 und 12 festgestellt (10 und 12 für Beläge mit um 50% reduzierter Bogenlänge). Abbildung 6 zeigt die Temperaturverteilung in Umfangsrichtung und die zugehörigen Amplitudenspektren der Temperaturschwankungen. Bei allen Versuchen dieser Reihe betragen die mittleren Temperaturschwankungen ca. 300°C . Mit voller Belaglänge bildeten sich elf, mit reduzierter Belaglänge jeweils zwölf Hotspots entsprechend eines mittleren Bogenabstands von 30° zwischen den einzelnen Hotspots. Damit ist der Abstand zwischen den einzelnen Hotspots größer als die Belaglänge (23°), wodurch die in [4] vorgestellten Bedingung für die Hotspotbildung durch thermoelastische Instabilitäten verletzt wird und somit diese Theorie falsifiziert wird.

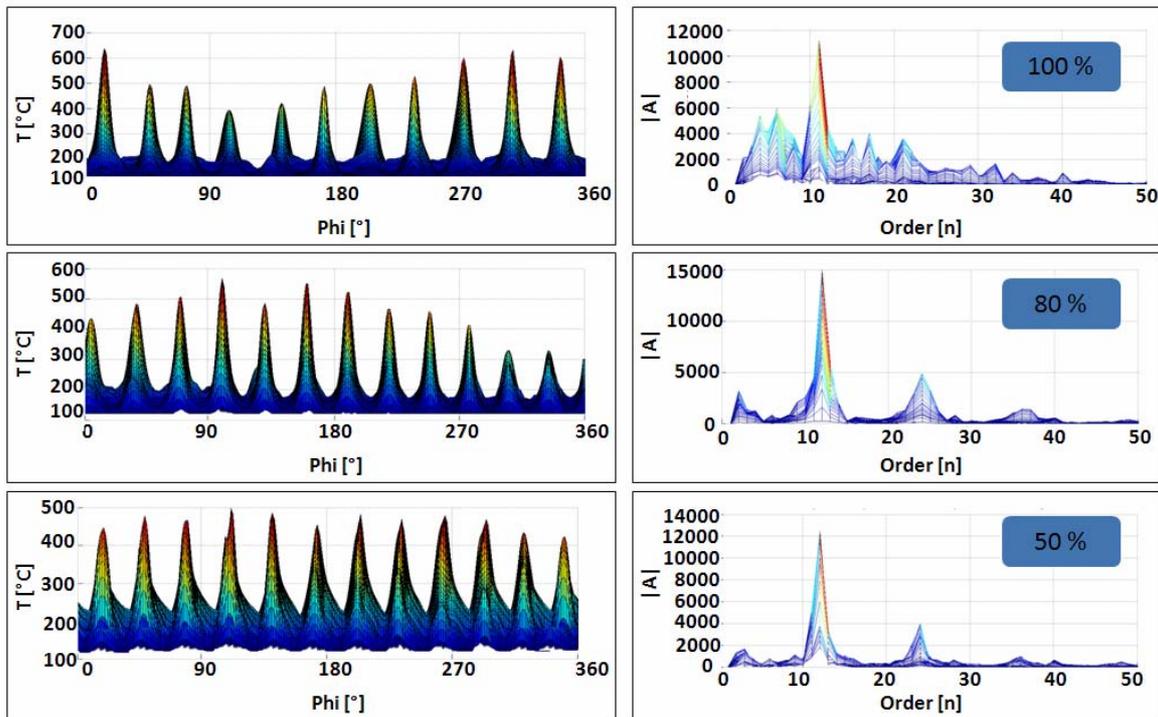


Abbildung 6: Temperaturverteilung in Umfangsrichtung (links) und Ordnungen der Temperaturschwankungen (rechts) für Beläge unterschiedlicher Bogenlänge

4.2 Hotspotentstehung

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal von möglichen Modellvorstellungen zur Hotspotbildung besteht in der Frage, ob der Hotspotbildungsprozess durch einen zuerst entstandenen Hotspot initiiert wird bzw. ob die Bildung der Hotspots simultan erfolgt. Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Amplitude der elften Ordnung des Temperatursignals (Ordnung der sich im weiteren Verlauf der Bremsung einstellenden Hotspots) für die ersten zweihundert Umdrehungen nach Bremsdruckaufbau einer Schlepplbremsung bei 160 km/h und mit einem Bremsmoment von 310 Nm. Bis zur 50. Umdrehung (ca. 2,5 Sekunden) ist keine signifikante Veränderung der Amplitude festzustellen. Die entsprechende Temperaturverteilung über den Brems Scheibenumfang in einem mittigen Radius gibt die untere Kurve in Abbildung 8 wieder. Dies gilt auch für die anderen für Hotspots relevanten Ordnungen. Temperaturschwankungen über den gesamten Umfang betragen maximal 3°C. Die dominante Ordnung der Temperaturschwankungen ist die vierzigste, was der Anzahl der Kühlkanäle der Brems Scheibe entspricht. Das Vorhandensein eines abgesonderten, hotspotähnlichen Bereichs kann nicht festgestellt werden. Ab diesem Zeitpunkt jedoch steigt die Amplitude der elften Ordnung an, diese wird dann auch im Gesamtspektrum zunehmend dominant.

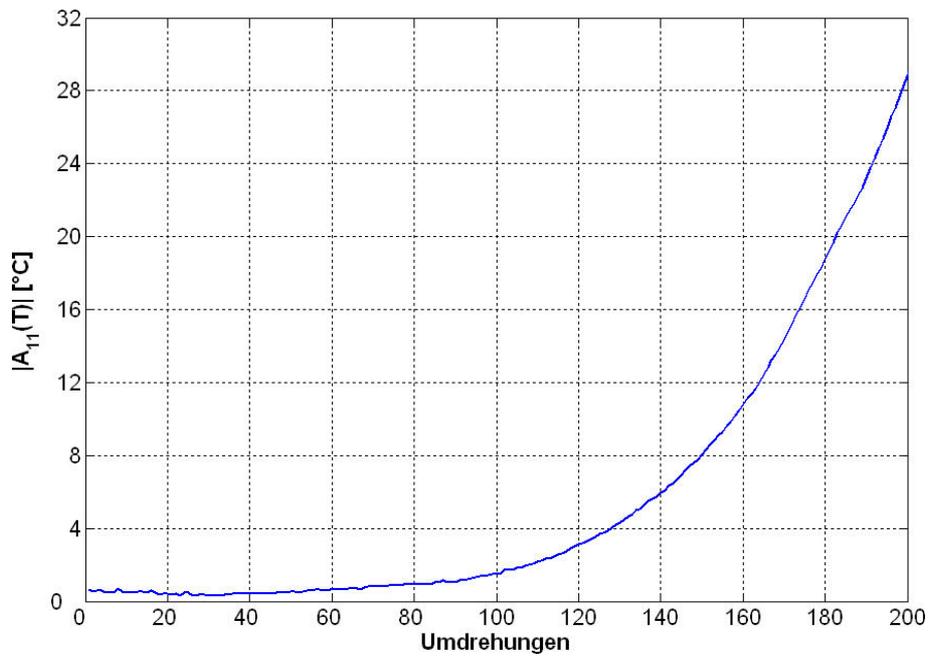


Abbildung 7: Verlauf der Temperaturamplitude elfter Ordnung für die ersten zweihundert Umdrehungen

Die damit verbundene Entstehung der Hotspots ist in den weiteren in Abbildung 8 dargestellten Temperaturverläufen für die 150. bzw. 200. Umdrehung zu erkennen. Daraus lässt sich für das betrachtete System die Schlussfolgerung ableiten, dass die Bildung von Hotspots nicht von einer Störung in Form von einem lokalen Bereich erhöhter Temperatur initiiert wird, sondern dass die Bildung der Hotspots über den Bremsscheibenumfang gleichzeitig erfolgt. Unmittelbar an dieser Erkenntnis schließt sich nun die Frage über die Mechanismen an, die zu der beobachteten simultanen Hotspotbildung führen.

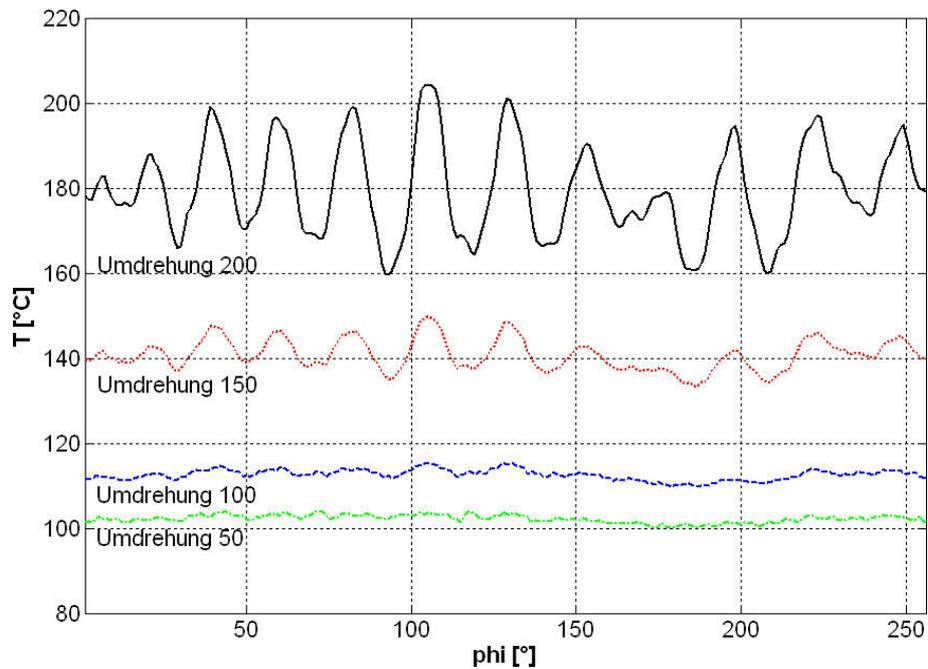


Abbildung 8: Temperaturverlauf der Faustseite am mittleren Radius für verschiedene Zeitpunkte

Bereits orientierende Versuche zeigten, dass bei einem Zustand ausgebildeter Hotspots eine Korrelation zwischen Temperatur- und Verformungsverläufen besteht. Nun ist zu untersuchen, ob Hotspots als Folge von Bremsscheibenverformungen entstehen oder ob die Verformungen als Folge der durch Hotspotbildung hervorgerufenen thermischen Spannungen und Ausdehnungen verursacht werden. Abbildung 9 zeigt die Topographie der Faustseite der Bremsscheibenoberfläche unmittelbar vor Betätigung der Bremse. Deutlich zu erkennen ist ein Schlag von ca. 20 μm , jedoch weist die Oberfläche keine Deformationen in den üblichen Ordnungen des Hotspotauftretens auf.

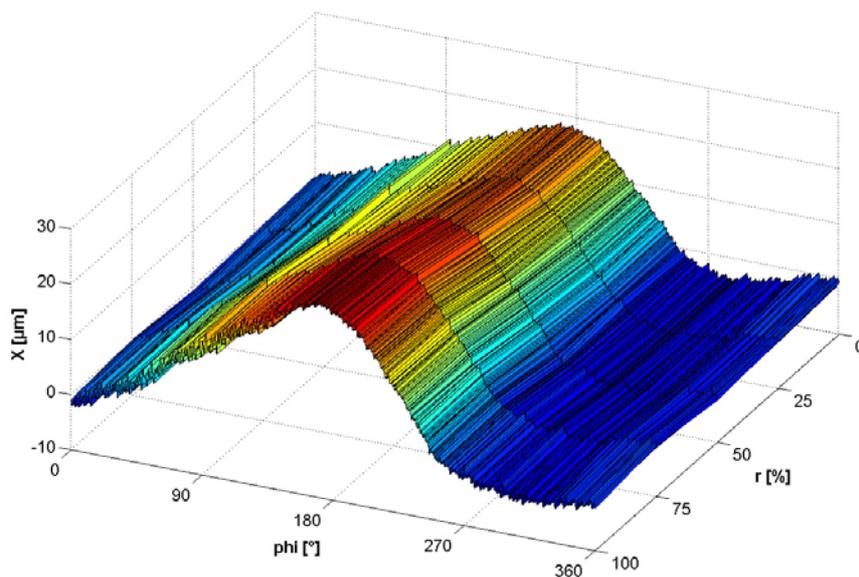


Abbildung 9: Topographie der Bremsscheibe vor der Bremsung

Nach Bremsdruckaufbau unterliegt die Bremsscheibe mechanischer und thermischer Belastung. Unmittelbar nach Beginn des Bremsvorgangs wird die Bremsscheibenform instabil, wie die in Abbildung 10 dargestellten Verläufe der durch einen an der Faustseite im mittleren Radius des Reibringes platzierten Abstandsensor erzeugten Signale für drei aufeinander folgende Umdrehungen verdeutlichen.

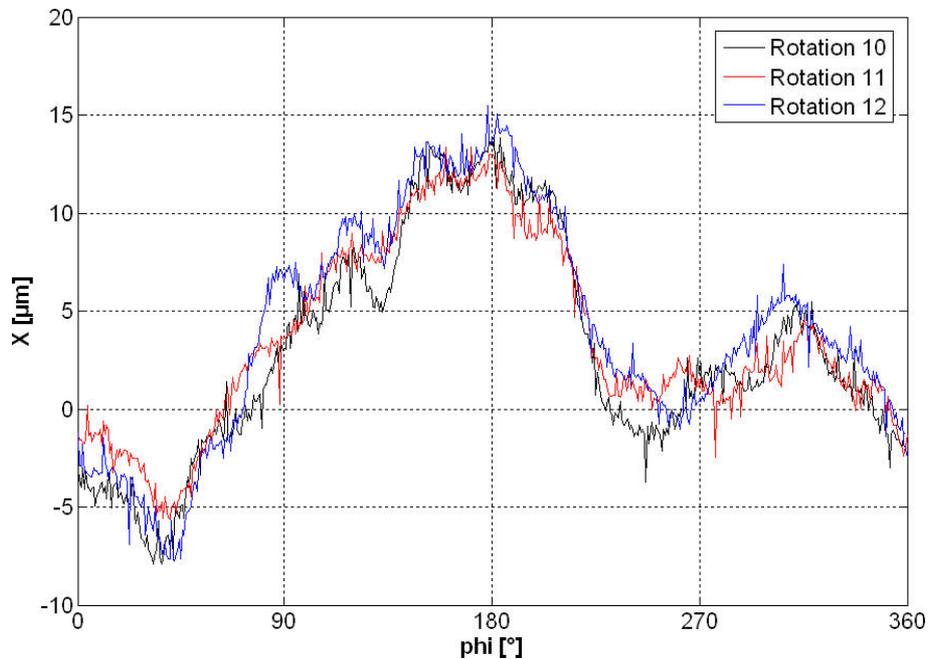


Abbildung 10: Verschiebungssignale von drei Umdrehungen kurz nach Beginn der Bremsung

Für die betrachtete Bremsung stabilisiert sich nach knapp zwei Sekunden zunehmend die Bremsscheibenform. Zum Teil deutlich davon abweichende Zeiten wurden jedoch bei verschiedenen anderen Bremsungen beobachtet. Abbildung 11 zeigt die Verläufe der Signale des Abstandssensors für die Umdrehungen 47-50, d.h. bevor der Beginn der Hotspotbildung feststellbar ist (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8). Bereits in dieser Phase ist die elfte Ordnung die dominante unter den höheren Ordnungen im Amplitudenspektrum der Verwellung der Bremsscheibentopographie. Die Phasenlage der einzelnen Verläufe befinden sich in einem Band von $\pm \pi/8$.

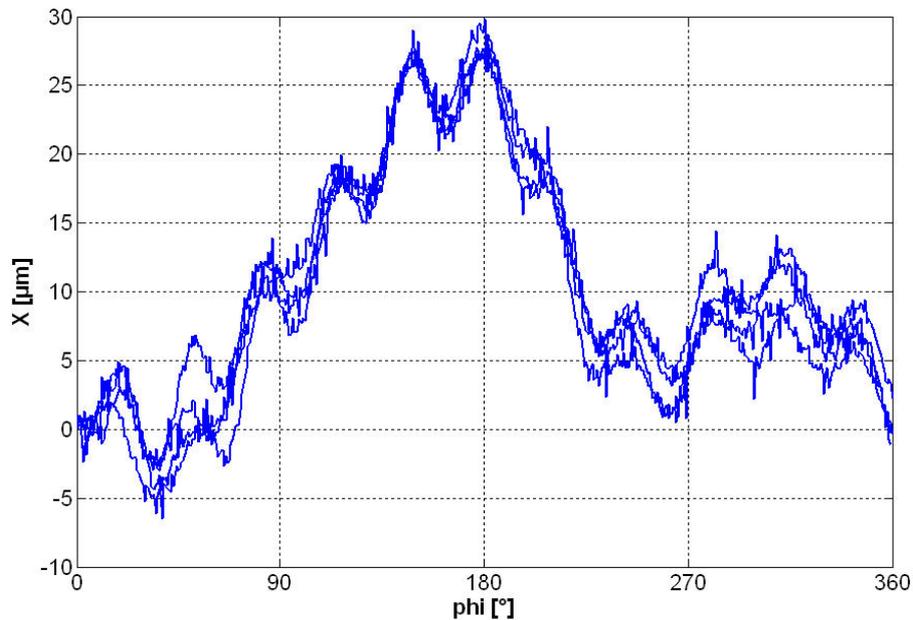


Abbildung 11: Verschiebungssignale von vier Umdrehungen vor Auftreten der Hotspots

Die dreidimensionale Darstellung der Bremsscheibentopographie in Abbildung 12 verdeutlicht die Form der sich einstellenden Verwellung. Diese streckt sich vom inneren bis zum äußeren Reibringradius und ist gerade zur Scheibenrotationsachse ausgerichtet.

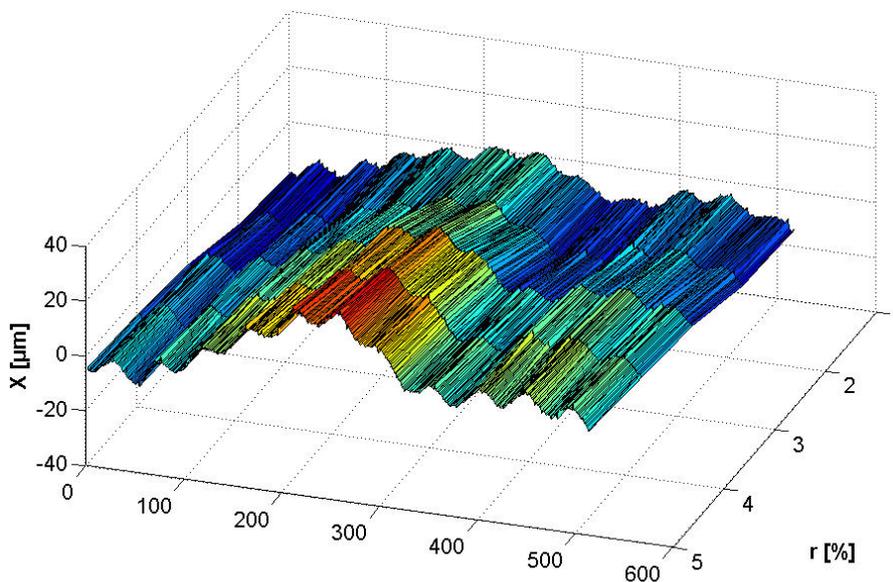


Abbildung 12: Topographie der Bremsscheibe fünf Sekunden nach Bremsbetätigung

Das Verhältnis zwischen den jeweiligen Wachstumsraten der Amplituden der elften Ordnung für Verwellung und Temperaturschwankungen bei den ersten 300 Umdrehungen der Bremsung gibt Abbildung 13 wieder. Bereits zu Beginn der Bremsung stellt sich eine Welligkeit der elften Ordnung ein, die sich an dem Wert der Amplitude bemerkbar macht. Schwankungen der Temperaturverteilung in der elften Ordnung können zunächst dagegen faktisch nicht fest-

gestellt werden. Die Amplitude der Welligkeit nimmt unmittelbar nach Druckaufbau zunächst deutlich stärker zu als die Amplitude der Temperaturschwankungen. 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. Eine andere Darstellung dieses Vorgangs ist in Abbildung 14 zu sehen. Dabei sind die Verläufe der beiden Amplituden über die ersten zweihundert Umdrehungen abgebildet.

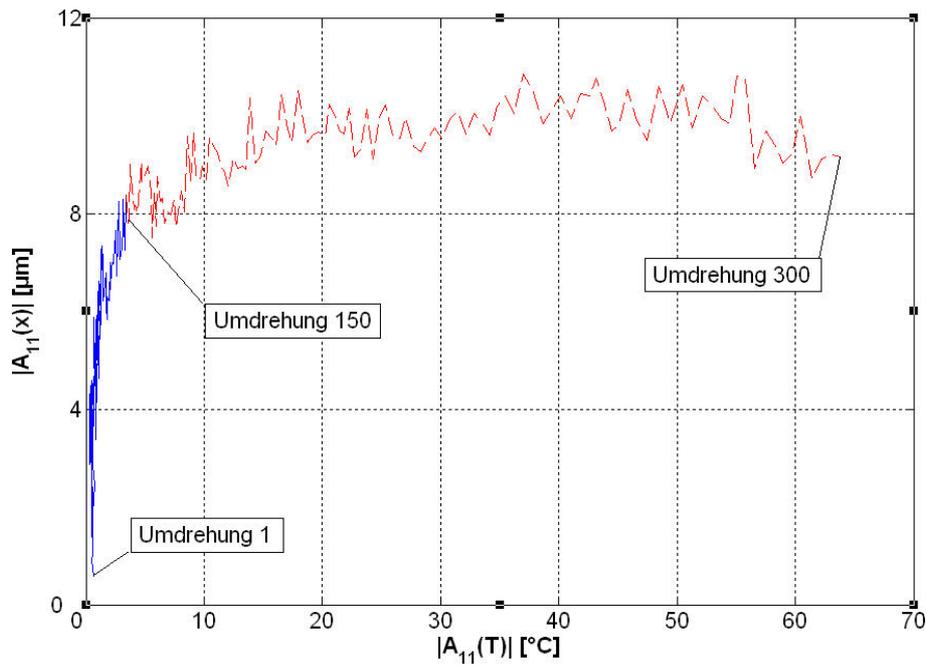


Abbildung 13: Verhältnis zwischen den Amplituden erster Ordnung für Verwellung und Temperaturschwankungen bei den ersten 300 Umdrehungen der Bremsung

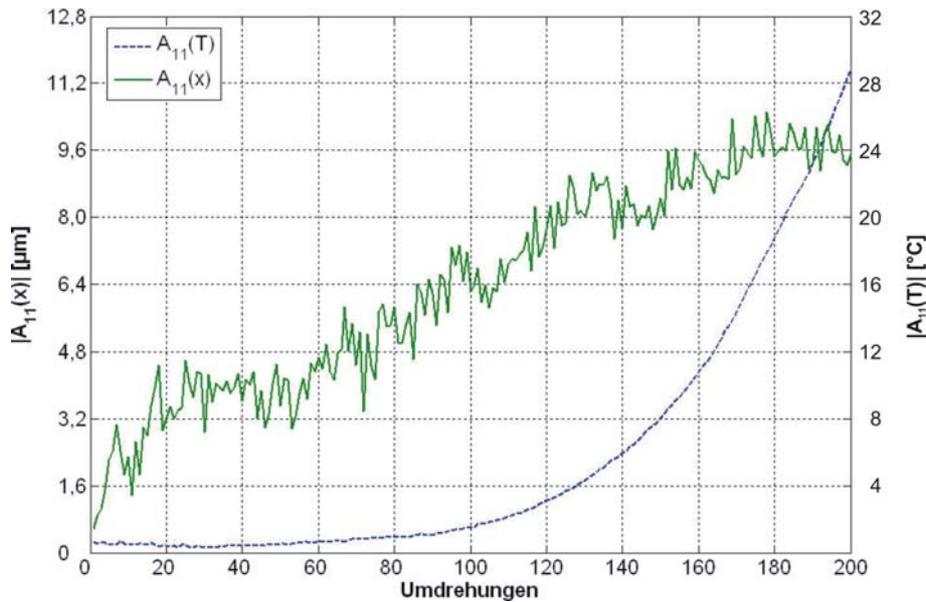


Abbildung 14: Verlauf der Amplituden elfter Ordnung für Verwelligung und Temperaturschwankungen bei den ersten 200 Umdrehungen der Bremsung

Mit der Hotspotentstehung verschiebt sich die Phasenlage der Oberflächenwelligkeit allmählich im Verlauf der Bremsung. Es wird jedoch keine sprunghafte Veränderung der Phasenlage festgestellt. Abbildung 15 zeigt die gemessene Oberflächentopographie über den Bremscheibenumfang 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.

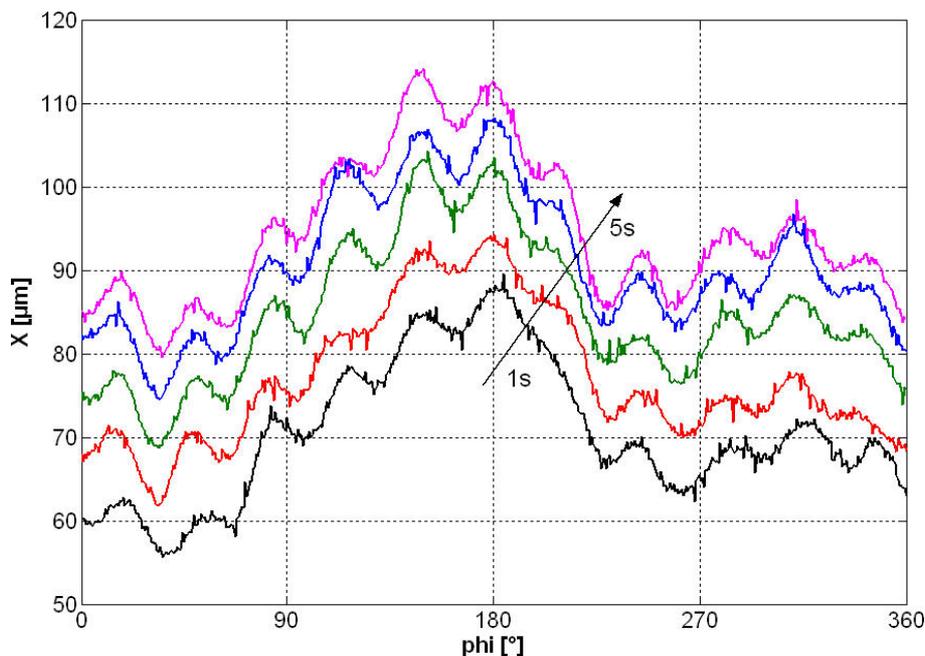


Abbildung 15: Gemessene Oberflächentopographie für fünf Umdrehungen in den ersten fünf Sekunden nach Bremsdruckaufbau

Neben der bei thermomechanischer Belastung entstehenden Welligkeit wird im Bereich der Wellenberge aufgrund der Hotspotbildung an diesen Stellen eine zusätzliche thermische Ausdehnung gemessen. Abbildung 16 zeigt die Topographieverläufe für Faust- (FS) und Kolbenseite (KS) sowie die daraus errechneten Scheibendickenschwankungen (DTV) für einen Radius mit nur schwach ausgebildeten Hotspots auf der Kolbenseite (oberes Diagramm) bzw. für einen Radius mit ausgeprägter Hotspotbildung auf der Faustseite (unteres Diagramm). Die annähernd gleiche Phasenlage der Signale von thermischer Ausdehnung durch Hotspots und Topographie verdeutlichen, dass die Hotspots auf den Wellenbergen entstehen.

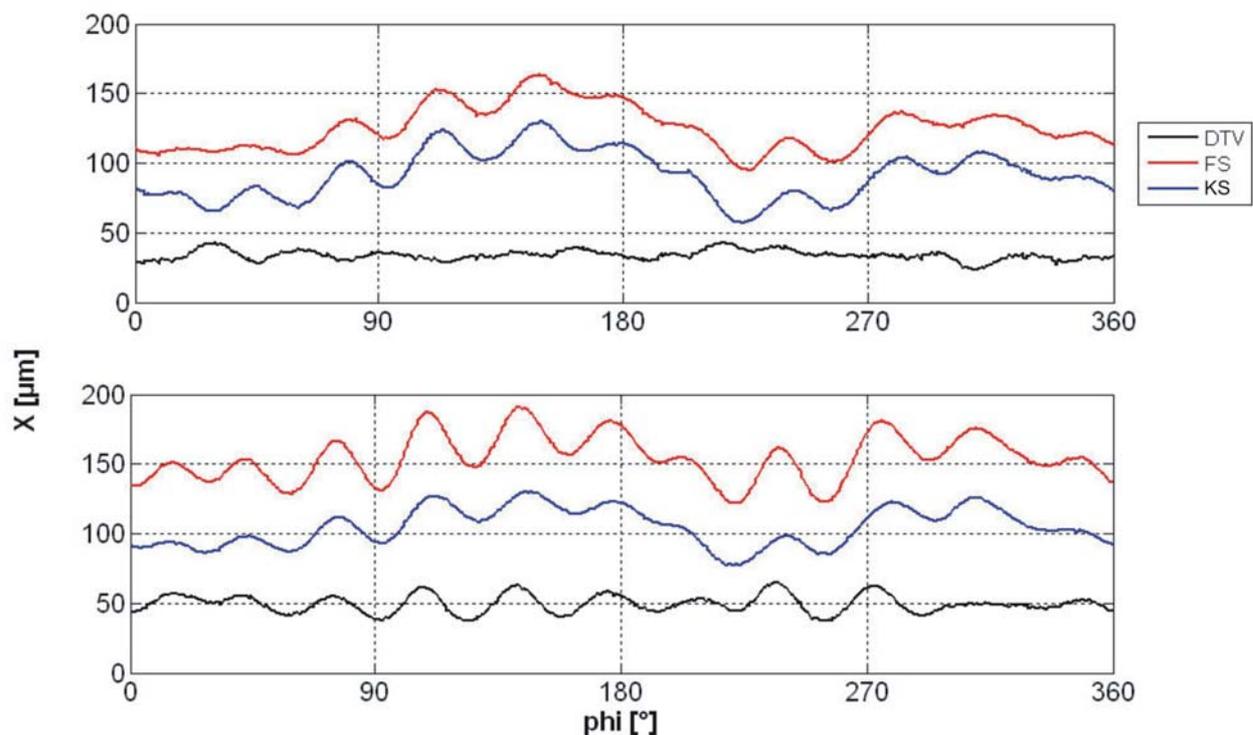


Abbildung 16: Scheibenverformung an einem Radius ohne (oben) und an einem Radius mit Hotspots (unten) während einer Umdrehung

4.3 Bremsscheibenverformung bei rein thermischer Belastung

Die Ergebnisse der Bremsversuche zeigten, dass die Bremsscheibe eine wellige Form annimmt, bevor entsprechende Temperaturschwankungen festgestellt werden konnten. Somit lässt sich vermuten, dass die Verwellung allein durch eine Erwärmung entsteht, ohne dass 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.

4.3.1 Versuchsaufbau und Versuch

Zur Bestimmung des Verformungsverhaltens der Bremsscheibe bei rein thermischer Belastung wurde ein spezieller Prüfstand aufgebaut. Dieser ist in Abbildung 17a dargestellt. Dabei ist die Scheibe wie beim Schwungmassenprüfstand am Original-Achsschenkel befestigt und wird über einen Elektromotor angetrieben. Die Temperatur der Reibring wird mittels Thermoschleifensensor erfasst. Zur manuellen Kontrolle der Temperaturverteilung während des Versuchs wurden weitere Thermoelemente eingesetzt. Zwei Propangasbrenner erhitzen die Scheibe von beiden Seiten (Abbildung 17b). Zur Messung der Scheibenverformung kommen wieder kapazitive Sensoren zum Einsatz, die wie bei den Versuchen am Schwungmassenprüfstand angebracht sind.

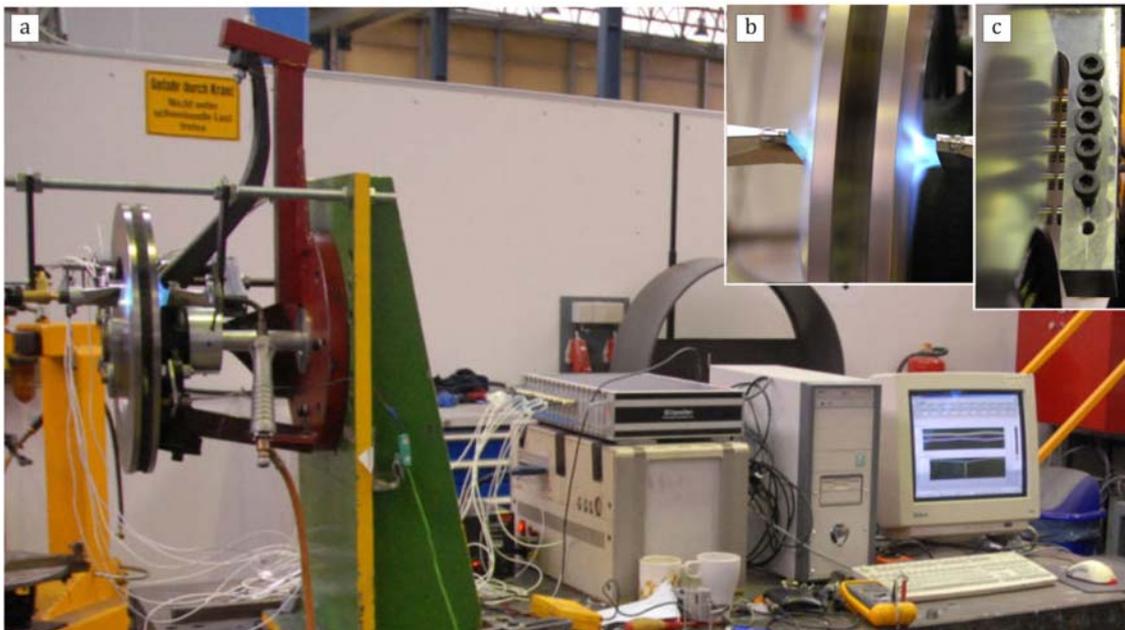


Abbildung 17: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Verformungsverhaltens der Bremsscheibe bei rein thermischer Belastung

Beim Versuch wurde die Bremsscheibe bei konstanter Drehzahl von 100 U/min 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. Allerdings konnte mit diesem Versuchsaufbau nur ein Sechstel des Wärmeleistungseintrags erreicht werden, der bei den hier gezeigten Schleppbremsungen vorhanden war.

4.3.2 Versuchsergebnisse

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

Abbildung 18 zeigt beispielhaft den Verlauf des Wegsignals am mittleren Reibradius der Bremsscheibe während der Erwärmung bei einer Untersuchungstemperatur von 160 °C. Festzustellen ist 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.

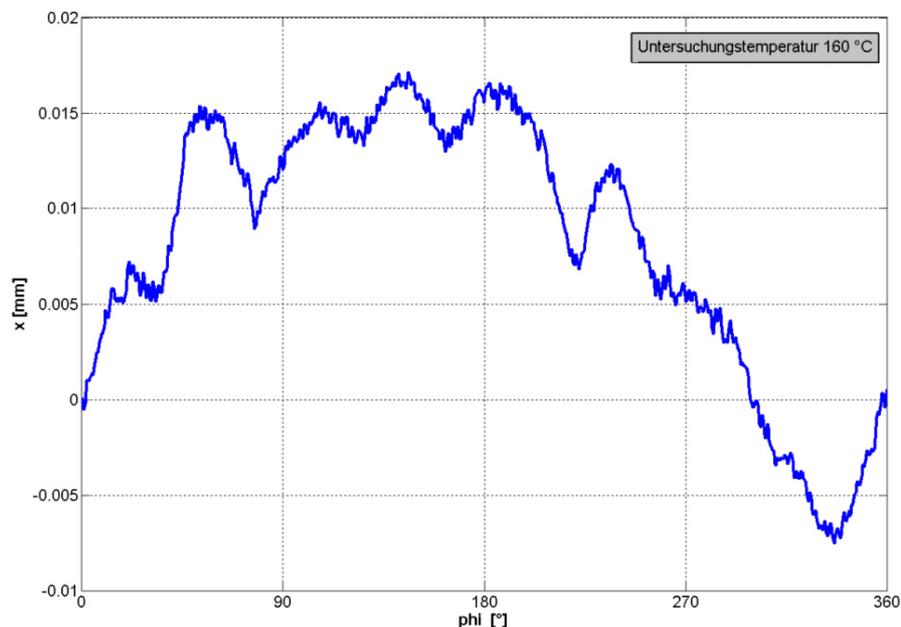


Abbildung 18: Topographie eines Reibrings während der Erwärmung

4.4 Simulation

Ergänzend zu den Ergebnissen aus experimentellen Untersuchungen wurden Simulationen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) durchgeführt. Dabei war das Ziel zu prüfen, ob sich die Versuchsergebnisse grundsätzlich durch Simulation nachbilden lassen sowie eine Parametervariation durchzuführen.

Um das Modell möglichst einfach zu halten, wurde eine Vollscheibe ohne Topf modelliert. Die Anbindung an den Topf ist durch entsprechende Randbedingungen für die Freiheitsgrade am inneren Reibringradius nachgebildet worden. Des Weiteren wurden die Werkstoffkennwerte als konstant angenommen.

Eine Untersuchung an dem FEM-Modell, bei der die ebene Scheibe rein thermisch mit einem homogenen Wärmestrom belastet wurde, hatte zum Ergebnis, dass sich in der Tat eine Ver-

wellung eingestellt hat, wenn auch als 18. Ordnung. Abbildung 19 zeigt das Ergebnis der Berechnung über den auf 1 normierten Umfang für den mittleren Radius.

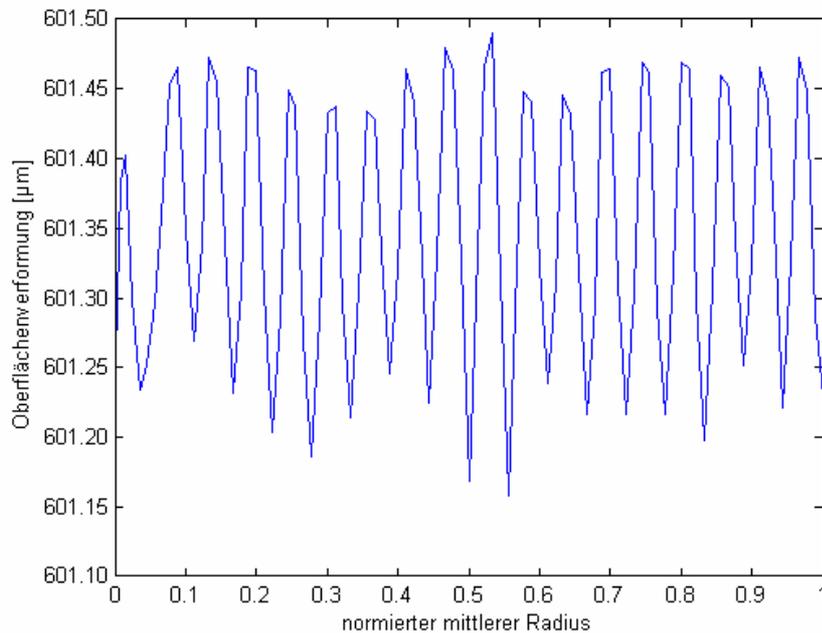


Abbildung 19: Verformung der Bremsscheibe unter rein thermischer Belastung

Durch Erhöhung der thermischen Spannungen mittels Parametervariation nahm die Größenordnung der Verwellung erheblich zu. Trotz quantitative Abweichungen der Werte um teilweise mehrere Größenordnungen bestätigen die Simulationsergebnisse die aus den Beobachtung der Versuchen abgeleiteten Annahme, dass Temperaturgradienten in axialer Richtung ohne Temperaturschwankungen in Umfangsrichtung zu einer Verwellung führen.

Eine weitere Untersuchung beschäftigte sich mit dem Erwärmungs- und Verformungsverhalten einer bereits verwellten Bremsscheibe. Dabei wurde von einer Anfangswelligkeit 9. Ordnung ausgegangen und die Scheibe topographieabhängig erwärmt. Das heißt, dass entsprechend der Flächenpressungsverteilung im Falle einer Vollbelagbremse, der lokale Wärmestrom der axialen Verformung proportional ist. In Abbildung 20 ist das Verschiebungsfeld der Bremsscheibe nach einer Simulationszeit von 5 Sekunden dargestellt. Die Zahlenwerte in Millimetern geben die Verschiebung der Knoten relativ zur anfänglichen Verformung an.

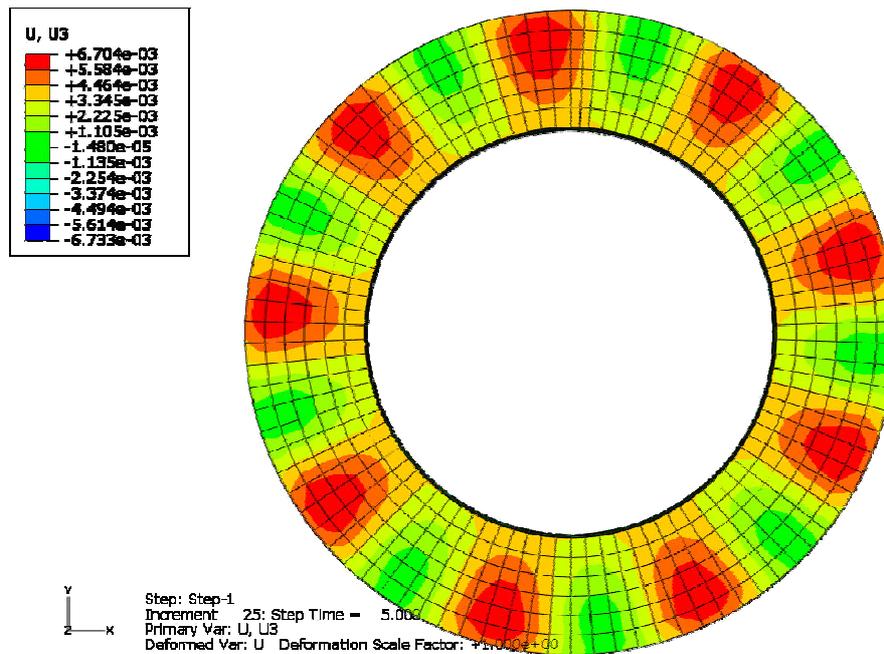


Abbildung 20: Verschiebungsfeld nach 5 Sekunden bei anfänglicher Verwellung 9. Ordnung

Das Ergebnis der Berechnung hat gezeigt, dass die Bildung von Hotspots nicht nur eine thermische Ausdehnung im Bereich der Hotspots bewirkt hat, sondern auch eine Verstärkung der Anfangswelligkeit, was mit den Versuchsergebnissen in Übereinstimmung gebracht werden kann.

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus Versuch und Simulation führen zu den folgenden Erkenntnissen, die den Entstehungsprozess der zu Heißrubbeln führenden Hotspots beleuchten:

- Hotspots können gleichzeitig ohne erkennbaren Keim entstehen.
- Unter thermomechanischer Belastung weist die Bremsscheibe unter bestimmten Bedingungen unmittelbar nach Bremsdruckaufbau eine instabile Form auf.
- Im weiteren Verlauf der Bremsung stabilisiert sich graduell die Bremsscheibentopographie. Zugleich entsteht eine Verwellung in Umfangsrichtung, bevor Temperaturschwankungen in üblichen Hotspotordnungen gemessen werden. Die Ordnung dieser Verwellung bleibt in weiteren Verlauf der Bremsung konstant, deren Amplitude nimmt kontinuierlich zu. Die Phasenlage der Verwellung verändert sich im Verlauf der Bremsung nicht bzw. nur leicht.
- Die jeweils dominanten Ordnungen von Verwellung und Temperaturschwankung stimmen überein. Hotspots bilden sich auf den Wellenbergen aus. Das Auftreten von Hotspots bewirkt eine Vergrößerung der Welligkeitsamplitude.

- Bei rein thermischer Belastung mit in Umfangsrichtung homogener Wärmezufuhr konnte das Auftreten wellenförmiger Deformationen ebenfalls festgestellt werden.
- Ergebnisse einer Simulation mittels FEM mit einem stark vereinfachten Brems Scheibenmodell zeigten, dass sich bei rein thermischer Belastung der Brems Scheibe mit einem homogenen Wärmestrom eine Verwellung einstellt.

Tabelle 2 enthält eine Gegenüberstellung von Auszügen bekannter Modellvorstellungen zur Hotspotentstehung zu den Versuchsergebnissen.

Tabelle 2: Gegenüberstellung von Modellvorstellungen und Versuchsergebnissen

Modellvorstellung	Beschreibung der Hotspotentstehung laut Modell	Gegenüberstellung zu den Versuchsergebnissen
[4] (S. 607 ff)	Hotspots entstehen aufgrund von thermoelastischer Instabilität oberhalb einer kritischen Geschwindigkeit, die von den Werkstoffeigenschaften sowie von der Geometrie der Scheibe und des Belages abhängt. Damit kinematische Stabilität gegeben ist, muss der Bremsbelag zu jedem Zeitpunkt von mindestens einem Hotspot abgestützt sein, so dass der Abstand zwischen den einzelnen Hotspots höchstens die Länge des Bremsbelags in Umfangsrichtung betragen kann.	Bei Bremsungen mit Bremsbelägen einer Bogenlänge von 23° betrug die Anzahl der Hotspots zwischen zehn und zwölf. Dies entspricht einem Bogenmaß von 36° bis 30° . Der Abstand zwischen den einzelnen Hotspots kann folglich größer als die Länge des Bremsbelags in Umfangsrichtung sein. ⇒ Widerspruch
[5] (S. 52ff)	Aufgrund von thermischen Spannungen entsteht zunächst eine Wellung mit zwei Wellenbergen bzw. -tälern. Bei ausreichend hoher thermischer Belastung ent-	Eine ausgeprägte Wellung der zweiten Ordnung aufgrund thermomechanischer Belastung wurde nicht beobachtet, sondern eine simultane Bildung von 8 bis 12 Wel-

	steht anschließend eine Welligkeit 6. Ordnung, die zur Bildung von sechs Hotspots führt.	len nach Beginn der Bremsung. ⇒ Widerspruch
[8] (S. 28)	Eine lokale Temperaturerhöhung führt zu Druckschwankungen in Umfangsrichtung. Auf diese Weise kommt es zur Hotspotentstehung.	Lokale Temperaturerhöhungen wurden erst nach Feststellung einer ausgeprägten Welligkeit gemessen. Die Bildung eines ersten Hotspots wurde nicht beobachtet. ⇒ Widerspruch
[9] (S. 409)	Ein örtlicher Temperatursprung führt zur Bildung eines „Hügels“. Ein Hügel auf einer Bremsscheibenseite führt zu zwei weiteren Hügeln auf der Gegenseite, worauf sich dort jeweils wieder höhere Temperaturen einstellen. Dadurch setzt sich die Störung fort, es bilden sich fortwährend weitere Hügel und somit Hotspots.	Lokale Temperaturerhöhungen wurden erst nach Feststellung einer ausgeprägten Welligkeit gemessen. Die Bildung eines ersten Hotspots bzw. „Hügels“ wurde nicht beobachtet. ⇒ Widerspruch
[10] (S. 35ff)	Hotspots entstehen aufgrund von Deformationen durch die Radbolzenkräfte bzw. ungleichmäßige Anzugsmomente der Radbolzen.	Bei den durchgeführten Versuchen zeigten die Bremsscheiben in ungebremstem Zustand keine Verwellung der charakteristischen Ordnungen von Hotspots ⇒ Widerspruch

5 Modellvorstellung zur Entstehung von Hotspots

In Übereinstimmung mit den aufgeführten Versuchsergebnissen ist eine prinzipielle Modellvorstellung zur Entstehung von Hotspots entstanden, die nachfolgend vorgestellt wird.

Der Anteil der Bremsenergie, der als Wärmestrom in die Bremsscheibe fließt, führt aufgrund der instationären Wärmeleitung in der Scheibe zu einem Temperaturgradienten in axialer

Richtung. Zu Beginn der Bremsung ist dadurch die Temperatur in der Scheibenmitte geringer als in den äußeren Bereichen. Stellt man sich nun die Reibringe der Bremsscheibe in axialer Richtung in Kreisringscheiben infinitesimal kleiner Dicke zerlegt vor, so würden sich diese im ungefesselten Zustand entsprechend der jeweiligen Temperatur ausdehnen. Dies ist vereinfacht in Abbildung 21 dargestellt: Eine Vollscheibe, die zur besseren Anschaulichkeit in fünf grobe Kreisringscheibenelemente unterteilt ist, wird auf den beiden Reibringen durch einen als zunächst homogen angenommenen spezifischen Wärmestrom \dot{q} erwärmt, worauf sich eine Temperaturverteilung in axialer Richtung einstellt. Im freien, ungefesselten Zustand, würden sich die Elemente entsprechend Fall a) unterschiedlich stark ausdehnen. Da sie jedoch wie in Fall b) miteinander verbunden sind, können sich die wärmeren, äußeren Elemente nicht in vollem Maße ausdehnen, während die inneren, kühleren Elemente stärker gedehnt werden, was in den einzelnen Elementen zu Zug- bzw. Druckspannungen σ_φ führt. Zusätzlich wird die freie Ausdehnung in axialer Richtung durch die Anbindung am Scheibentopf verhindert.

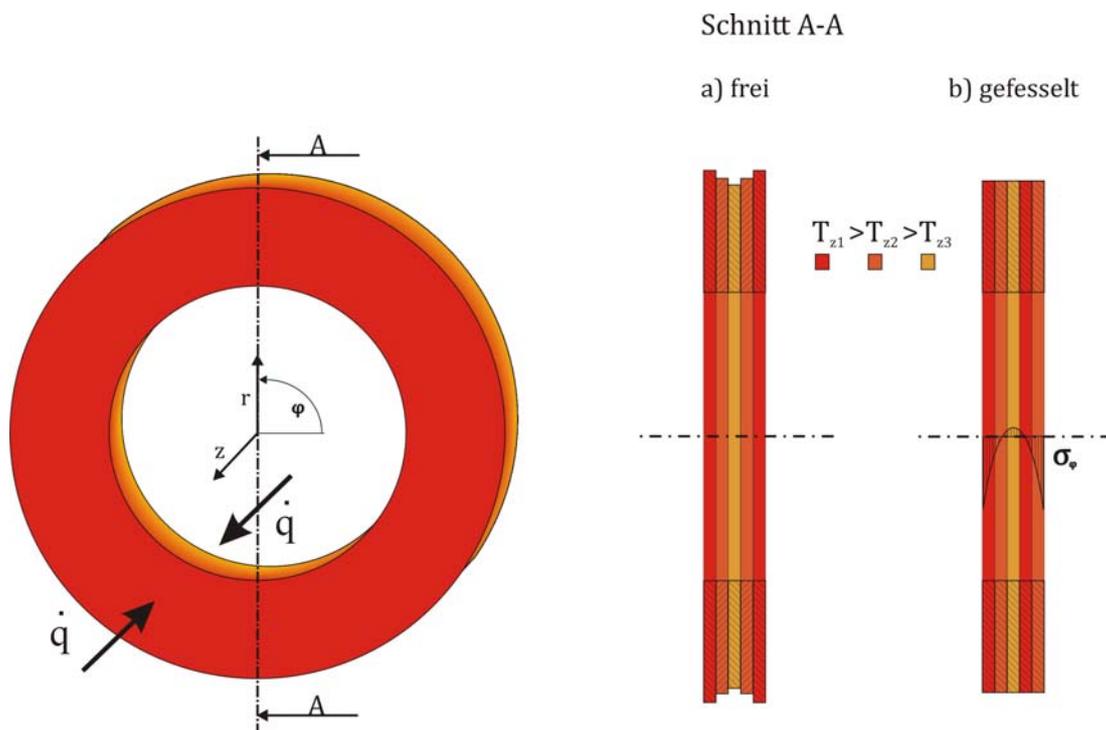


Abbildung 21: Wärmedehnung der freien (a) und gefesselten (b) Kreisringscheibenelemente

Die Temperaturspannungen in den äußeren Kreisringscheiben werden mit zunehmender Temperaturdifferenz zu benachbarten Elementen größer. Dadurch kommt es zu einem instabilen energetischen Zustand, welcher zur Stabilisierung einer weiteren Ausdehnung in Umfangsrichtung bedarf. Da aber ein Wachstum in Umfangsrichtung durch die übrigen Elemente verhindert wird, kann dies durch eine laterale Verformung bzw. Verwellung der Kreisring-

scheibe geschehen. Die in der Scheibe gespeicherte elastische Deformationsenergie setzt sich hauptsächlich aus einem Anteil infolge thermisch induzierter Normalspannungen und einem Anteil infolge Biegung durch die Krümmung der Kreisringscheibe zusammen, der im ebenen Zustand verschwindet. Der erste Anteil nimmt mit zunehmender Verwellung ab, während der zweite in Abhängigkeit der Welligkeitsordnung und -amplitude zunimmt. Dabei würde sich, ohne Berücksichtigung der Anbindung am inneren Radius, der energetisch günstigste Zustand bei einer Verwellung erster Ordnung und entsprechend großer Amplitude einstellen. Berücksichtigt man jedoch die elastische Topfanbindung, so kommt ein weiterer Anteil infolge Querkraft zur Energiebilanz hinzu. Diese Querkraft ist eine Streckenlast in Umfangsrichtung, welche proportional zur Verformung der Kreisringscheibe ist. Die Welligkeitsamplitude kann daher nicht beliebig groß werden. Dies ist für ein äußeres Kreisringscheibenelement modellhaft in Abbildung 22 dargestellt: Die Anbindung wird dabei durch Federelemente modelliert, welche im ebenen Zustand der Scheibe entspannt sind.

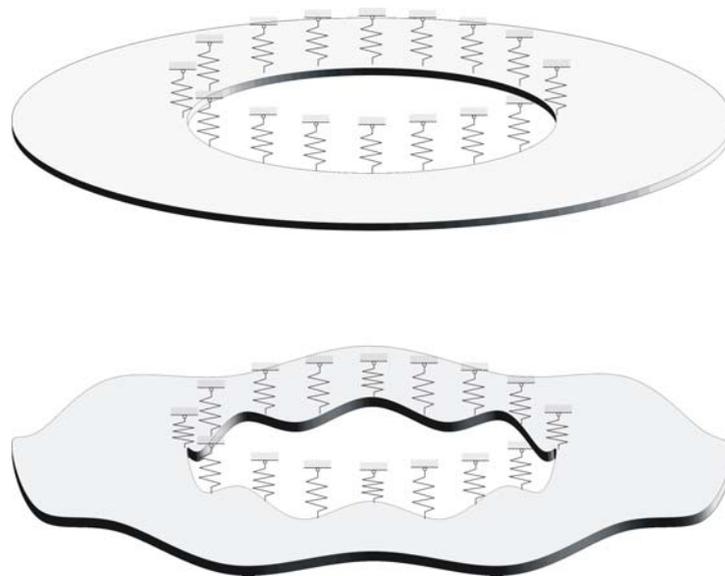


Abbildung 22: Modell der Topfanbindung durch Federelemente für den ebenen (oben) und verwellten (unten) Zustand eines Kreisringscheibenelements.

6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Entstehungsprozess von Hotspots auf der Bremsscheibenoberfläche durch Experimente mit einem serienrepräsentativen Bremssystem ermittelt. Es wurde festgestellt, dass vor Auftreten periodischer Temperaturschwankungen eine geometrische Wellung der Scheibe zu beobachten ist, als deren Folge eine dazu kohärenten Hotspotverteilung zu finden ist. Die Bildung von Hotspots führt zur Vergrößerung und Stabilisierung der Wellung. Dadurch wird die Überprüfung der zahlreichen und vielfältigen

theoretischen Erklärungsmodellen zur Hotspotbildung durch den Vergleich mit realen Messungen unter realistischen Bedingungen ermöglicht. Modelle, die von einer Initiierung der periodischen Temperaturschwankungen ohne vorherige Wellung ausgehen, wurden für dieses System falsifiziert.

Auch bei Bremsungen ohne Hotspotbildung (z.B. bei Verwendung kompressiblerer Bremsbeläge) sowie bei Erwärmung mit konstantem Wärmestrom konnte eine Anfangswelligkeit der Bremsscheibe festgestellt werden. Eine nahe liegende, jedoch nicht abgesicherte und deshalb noch zu prüfende Hypothese besteht darin, dass die für das untersuchte System festgestellte Wellung auch grundsätzlich bei anderen Bremssystemen die Entstehungsursache von Hotspots und Heißrubbeln darstellt. Weiterer Forschungsbedarf besteht außerdem in der Untersuchung der Mechanismen, die zur Wellung der Bremsscheibe führen als Grundlage zur Ableitung von Maßnahmen zur Unterdrückung der Welligkeitsbildung. Erfahrungen aus der Praxis sowie zahlreiche bekannte Untersuchungen belegen zudem, dass diverse Eigenschaften von Komponenten der Radbremse (Sattel, Beläge und Scheibe) die Systemanfälligkeit hinsichtlich Heißrubbeln beeinflussen. Ein zusätzlicher Schwerpunkt weiterführender Untersuchungen stellt deshalb die Ermittlung der Mechanismen zur Beschreibung der Sensitivität solcher Parameter bezüglich Hotspotbildung dar.

Die Grundzüge einer Modellvorstellung zur Abbildung der im Versuch beobachteten Phänomene wurde in diesem Artikel vorgestellt. Eine analytische Beschreibung dieser Modellvorstellung wird derzeit entwickelt und hinsichtlich ihrer Gültigkeit durch die Anwendung einer geeigneten Methode überprüft.

7 Literaturverzeichnis

- [1] BARBER, J. R.: 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
- [2] ENGEL, G. H.: Systemansatz zur Untersuchung von Wahrnehmung, Übertragung und Anregung bremseregter Lenkunruhe in Personenkraftwagen. *In: Fortschritt Berichte-VDI Reihe 12 Verkehrstechnik Fahrzeugtechnik* (1998)
- [3] KAO, T. K.; RICHMOND, J. W. ; DOUARRE, A.: Brake disc hot spotting and thermal judder: an

experimental and finite element study. In: *International Journal of Vehicle Design* 23 (2000) Nr. 3, S. 276-296

- [4] LEE, K.; BARBER, J.R.: Frictionally excited thermoelastic instability in automotive disk brakes. In: *ASME Journal of Tribology* 115 (1993) S. 607-614
- [5] PANIER, S.; 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
- [6] SARDÁ, A.; HAAG, M.; WINNER, H.; SEMSCH, M.: Experimental Investigation of Hot Spots and Thermal Judder. In: *SAE Paper* (2008) 08BC-0060
- [7] SCHUMANN, M.: Analysemethode zur Beurteilung des ungleichförmigen Brems-scheibenverschleisses an Pkw-Scheibenbremsen. In: *Fortschritt Berichte-VDI Reihe 12 Verkehrstechnik Fahrzeugtechnik* 635 (2006)
- [8] STEFFEN, T.: *Untersuchung der Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1998
- [9] STEFFEN, T. ; BRUNS R., : Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben. In: *ATZ. Automobiltechnische Zeitschrift* 100 (1998) Nr. 6, S. 408-414
- [10] SURYATAMA, D.; STEWART, D.J.; MELAND, S.C.; HOU, L.J.: Contact mechanics simulation for hot spots investigation. In: *SAE transactions* 110 (2001) Nr. 7, S. 35-46