1 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Die fortschreitende Elektrifizierung des Antriebsstrangs im Automobilsektor führt in vielen Fahrzeugkomponenten zu Anforderungsverschiebungen und Herausforderungen in der Entwicklung. Hierbei sticht die Radbremse hervor. Der eingesetzte Elektromotor sorgt einerseits für den Vortrieb des Fahrzeugs, andererseits kann mit diesem auch durch das Prinzip der elektromagnetischen Induktion das Fahrzeug verzögert werden. Dieses regenerative Bremsen ist im Rahmen des jeweiligen Rekuperationskennfeldes des Antriebsstrangs möglich und kann die erforderliche Bremsleistung durch das hydraulische Radbremssystem deutlich reduzieren. In vielen elektrifizierten Fahrzeugen kommt es bei Bremsungen in den Stillstand erst ab sehr geringen Geschwindigkeiten zu einem Eingriff der Radbremse und somit werden ca. 90 % der alltäglichen Bremsungen rekuperativ durchgeführt [1].

Beim heutigen Standardwerkstoff für Bremsscheiben in Personenkraftwagen handelt es sich um Gusseisen mit Lamellengraphit. Der günstige eisenbasierte Werkstoff ist einfach zu gießen, besitzt einen hohen Schmelzpunkt sowie eine ausreichende Wärmespeicherfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit sowie eine ausreichend hohe Verschleißbeständigkeit. Den veränderten Anforderungen in E-Fahrzeugen kann Grauguss allerdings nur bedingt gerecht werden. Die geringe Korrosionsbeständigkeit in Kombination mit dem reduzierten Einsatz der Radbremse führt zu einer Zunahme von Korrosionsangriffen auf den Reibflächen und in den Kühlkanälen belüfteter Bremsscheiben. Die geringen Bremsscheibentemperaturen infolge des regenerativen Bremsens verhindern das Verdampfen korrosiver Medien auf der Reibfläche und in den Kühlkanälen der Bremsscheiben und erhöhen den korrosiven Angriff. Eine reduzierte Leistungsfähigkeit des Bremssystems, eine verkürzte Lebensdauer und im Premiumfahrzeugsegment ebenfalls relevante optische Qualitätsmängel sind die Folge.

Des Weiteren stellt die Bremse neben dem Verbrennungsmotor und den Reifen eine der großen Emissionsquellen im Fahrzeug dar. Neben den veränderten fahrzeugtechnischen Anforderungen sind daher in naher Zukunft auch neue gesetzliche Anforderungen bezüglich der Bremsstaubemission von Radbremssystemen zu erwarten [2–4].

Durch die Anforderungsverschiebung und die reduzierte Temperaturbelastung in elektrischen und hybridelektrischen Fahrzeugen erscheint daher eine Betrachtung des Potentials von aluminiumbasierten Bremsscheiben für zukünftige Fahrzeuggenerationen als sinnvoll. Die grundsätzlich gute Korrosionsbeständigkeit und die stark reduzierten Bremspartikelemissionen, beispielsweise in partikelverstärkten Aluminium-

Bremsscheibenkonzepten, sind Schlüsselkriterien, um zukünftigen gesetzlichen Vorgaben und den eigenen Qualitätsansprüchen der Automobilhersteller gerecht zu werden. Gleichzeitig reduziert das niedrigere spezifische Gewicht die ungefederten Massen und führt zu einer Effizienzsteigerung [5–7]. Neben der Vielzahl an Vorteilen, stellen die höheren Kosten und insbesondere der niedrige Schmelzpunkt in Verbindung mit der geringen volumenspezifischen Wärmekapazität von Aluminiumlegierungen eine Herausforderung für die Entwicklung eines Aluminium-Bremsscheibenkonzepts dar.
Zur Erfüllung der Verschleißanforderungen eines Bremsscheibensystems, sind verschleißarme Werkstoffkonzepte in Betracht zu ziehen. Neben übereutektischen Legierungen, werden vor allem partikelverstärkte Aluminiumlegierungen, das Eingießen keramischer Preforms und Verschleißschutzschichtsysteme auf den Reibflächen eines Aluminiumgrundkörpers in der Literatur diskutiert [8–11].

Ziel dieser Arbeit ist es, durch werkstoffliche Charakterisierung und Bremsenprüfstandsversuche eine Potentialabschätzung verschiedener aluminiumbasierter Bremsscheibenkonzepte durchzuführen, wobei der Fokus auf SiC-partikelverstärkten Legierungen und keramischen Beschichtungen auf Aluminiumsubstraten liegt. Die Auswahl dieser beiden Werkstoffkonzepte basiert auf Voruntersuchungen mit einer Vielzahl von Werkstoffsystemen. Hierzu wird die Entwicklung und Schädigung der Reibflächen unter kontinuierlicher Steigerung der Belastung in synthetischen Prüfprogrammen in trockener und korrosiver Umgebung abgeprüft. Die auftretenden Schädigungserscheinungen werden untersucht und durch Beschreibung der zugrundeliegenden Schädigungsmechanismen eingeordnet und bewertet. Ein Hauptaugenmerk liegt je nach Werkstoffkonzept auch auf der Entstehung von Transferfilmen auf den Reibflächen der Bremsscheibe. Da die maximale Einsatztemperatur in Bremsscheibensystemen eine übergeordnete Rolle spielt, werden Bremsversuche auch im thermomechanischen Grenzbereich des Werkstoffsystems durchgeführt. Die Verschiebung hin zu einer deutlich geringeren Nutzung der Radbremse in der Kundenanwendung und der damit verbundenen niedrigeren Anwendungstemperatur in elektrifizierten Fahrzeugen, wird für die Grundsatzuntersuchung im thermischen Grenzbereich nicht berücksichtigt. Nur so ist ein vollumfängliches Verständnis über die thermischen Schädigungen des Systems und die maximale Einsatztemperatur möglich.

2 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

2.1 Die Scheibenbremse

Die grundsätzliche Aufgabe der Radbremse besteht darin, das Fahrzeug in allen Situationen sicher abzubremsen, sowie im Stillstand gegen Wegrollen zu sichern. Beim Bremsen wird die kinetische Energie des Fahrzeugs durch Reibungsvorgänge an der Scheibenbremse in Wärmeenergie umgewandelt. Neben der Dissipation, kommt es zu einem kleinen Anteil auch zur Emission von Schallwellen, die als unterschiedliche Bremsgeräusche wahrgenommen werden können.
Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten eines hydraulischen Scheibenbremssystems im Detail vorgestellt. Die Konstruktion der Bremsscheibe beeinflusst maßgeblich den Wärmehaushalt, die Schirmung der Scheibe, die Wärmeleitung vom Reibring in den Topf, sowie in das Radlager und damit auch die Lebensdauer und Bremsperformance. Eine Werkstoffumstellung von Grauguss zu Aluminium mit seiner hohen Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit kann deshalb die Umsetzung anderer Scheibendesigns notwendig machen. Da die Eigenschaften des Tribosystems aus Bremsscheibe und Bremsbelag immer Systemeigenschaften sind, bestimmt die Auswahl eines Reibbelags nicht nur die Reibperformance und den Komfort des Bremssystems, sondern entscheidet maßgeblich auch über Verschleiß und Bremsstaub. Ein neuer Bremsscheibenwerkstoff kann durch die Wahl des falschen Bremsbelags daher sehr schnell als ungeeignet bewertet werden.

2.1.1 Aufbau der Scheibenbremse

2.1.1.1 Die Bremsscheibe

Bremsscheiben werden üblicherweise aus perlitischem Grauguss mit Lamellengraphit gefertigt. Die einfache Herstellung aufgrund der guten Gieß- und Bearbeitbarkeit, die Verschleißbeständigkeit und Dämpfungseigenschaften sowie die ausreichende Wärmeleitfähigkeit bei einem gleichzeitig niedrigen Kostenniveau machen Grauguss zum Werkstoff der Wahl [12, 13].
In Abbildung 2.1 ist der Aufbau gängiger Bremsscheibenkonzepte schematisch im Querschnitt dargestellt. Die Konzepte können in einteilige oder gebaute und in massive oder belüftete Varianten unterteilt werden. Eine einteilige Bremsscheibe wird in einem Stück gegossen und für gewöhnlich mit Hilfe eines sogenannten Schwanenhalses an den Reibring angebunden. Dieses konstruktive Vorgehen reduziert die Schirmung der Scheibe während des Bremsvorgangs. Gebaute Bremsscheiben können

auf verschiedene Arten gefügt werden und werden häufig als Hybrid- oder Leichtbau-Bremsscheibe bezeichnet, da der Bremsscheibentopf entweder aus einem Stahlblech oder aus Aluminium gefertigt wird. Abbildung 2.1c zeigt exemplarisch die Anbindung einer gebauten Bremsscheibe mittels Stiftverbindung. Beide Baukonzepte können grundsätzlich massiv oder innenbelüftet ausgeführt sein. Bei einer Innenbelüftung werden die beiden Reibringe über Kühlrippen verbunden und erhöhen somit die konvektionelle Wärmeabfuhr durch die entstehenden Kühlkanäle [14].

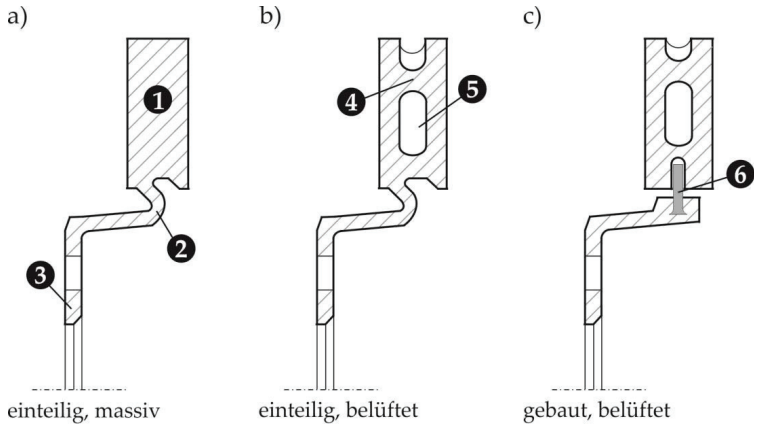

Abbildung 2.1: Schematische Darstellung typischer Bremsscheibenkonstruktionen im Querschnitt: 1 Reibring, 2 Schwanenhals, 3 Bremsscheibentopf, 4 Kühlrippe, 5 Kühlkanal, 6 Stiftverbindung.

In wie weit sich die Konstruktion einer Aluminium- von einer Grauguss-Bremsscheibe unterscheidet ist bisher nicht eingehend untersucht. Der neue Grundwerkstoff eröffnet hier eine Vielzahl von Fragestellungen. Die Bedeutung einer Innenbelüftung zur Optimierung der konvektionellen Wärmeabfuhr und der Stiftanbindung zur Reduktion der Schirmung steht in Grauguss-Bremsscheiben außer Frage, ist für Aluminium-Bremsscheiben mit einer deutlich höheren Wärmeleitfähigkeit bisher jedoch nicht geklärt. Auch die Verschraubung der Bremsscheibe mit der Radnabe über einen Bremsscheibentopf ist Stand der Technik, kann für Aluminium-Bremsscheiben mit deutlich höheren Bremsscheibentopftemperaturen und damit deutlich höheren Wärmeeintrag in die Radnabe jedoch problematisch werden. Einen Lösungsansatz bietet hier beispielsweise das „New Wheel Concept“ mit innenumgreifendem Bremssattel von Continental Teves AG & Co. oHG. Bei diesem Anbindungskonzept wird der Reibring mit der Felge verschraubt, welche dadurch als zusätzliche thermische Masse fungiert und die Bremsscheibentemperatur absenkt [15].

2.1.1.2 Der Bremssattel

Die Funktion des Bremssattels ist es, die Bremsbeläge zu halten bzw. zu führen und im Betätigungsfall an die Bremsscheibe zu drücken. In klassischen hydraulischen Bremssystemen wird der Druck durch die Pedalbetätigung des Fahrers auf die Bremsflüssigkeit in der Hydraulikleitung übertragen und über den oder die Bremskolben des Bremssattels an den Bremsbelag weitergegeben [14]. Die beiden gängigen Konstruktionsarten Fest- und Schwimmsattel sind in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt.

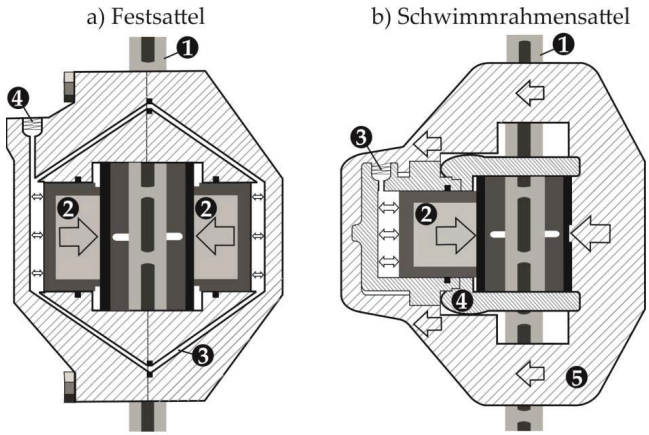

Abbildung 2.2: Festsattel (a) und Schwimmrahmensattel (b) gehören zu den weitverbreitetsten Konstruktionsvarianten eines Bremssattels. Festsattel: 1 Bremsscheibe, 2 Bremskolben, 3 Hydraulikleitung und 4 Position der Entlüftungsschraube. Schwimmrahmensattel: 1 Bremsscheibe, 2 Bremskolben, 3 Entlüftungsschraube, 4 Halter und 5 Rahmen, nach *Breuer* und *Bill* [14].

Die hohe Verwindungssteifigkeit der Festsattel-Konstruktion (Abbildung 2.2a) führt im Betriebstemperaturbereich zu einer geringeren Bremsvolumenaufnahme und ermöglicht die Verwendung von Aluminium als Gehäusematerial. Die hohe Zahl an Bremskolben in Festsätteln (gängig sind 4-, 6- und 10-Kolben) verbessert insbesondere bei niedrigen Bremsdrücken das Anlegen der Bremsbeläge an die Scheibe. Die komplexe Bauweise benötigt jedoch mehr Bauraum und führt zu höheren Herstellungskosten im Vergleich zu einem Schwimmrahmensattel. Schwimmend gelagerte Bremssättel (Abbildung 2.2b) verfügen häufig nur über einen Bremskolben und drücken nur direkt auf den inneren Bremsbelag. Durch das Anlegen des inneren Belags, wird der Bremssattel über eine Bolzenführung in die entgegengesetzte Richtung gedrückt und die resultierende Reaktionskraft legt wiederum den äußeren Bremsbelag an. Wesentliche Vorteile von Schwimmsätteln sind die geringeren Kosten und die gute Kühlung

der Bremsbeläge durch die offene Bauweise und damit verbunden eine geringere Bremsflüssigkeitstemperatur [14, 16].
In Vorversuchen zu dieser Arbeit haben vergleichende Untersuchungen zwischen einem Schwimmrahmensattel und einem Festsattel gezeigt, dass Unterschiede im gleichmäßigen Aufbau des Transferfilms auf einer Aluminium-Bremsscheibe nicht festzustellen sind. Es ist jedoch die Materialkombination einer Aluminium-Bremsscheibe mit einem Aluminium-Festsattel zu berücksichtigen. Während ein System aus hartem rotierenden und weichem stationären Werkstoff, wie beispielsweise der Kombination einer Grauguss-Bremsscheibe und einem Aluminium-Festsattel, nur zu geringfügigen Schäden an Scheibe und Sattel führt, kann der Kontakt einer Aluminium-Bremsscheibe mit einem Aluminium-Festsattel schwerwiegende Folgen haben. Bei der Kollision wird die Lackschicht des Sattels abgerieben und der Aluminium-Grundkörper steht in direktem Kontakt mit der Aluminium-Bremsscheibe. Aufgrund der hohen Adhäsionsneigung des Aluminiums, kann Bremsscheibenmaterial auf den Festsattel übertragen werden und eine formschlüssige Verbindung entstehen. In der Folge pflügt sich die Materialanhäufung über die rotierende Mantelfläche der Bremsscheibe, bis sich so viel Bremsscheibenmaterial im Bremsscheibenschacht des Sattels angehäuft hat, dass sich die Bremsscheibe verkeilt. Um eine Kollision zu verhindern, wurde das Schachtmaß des eingesetzten Aluminium-Festsattels im Vergleich zum Serienstand um 2 mm vergrößert.

2.1.1.3 Der Bremsbelag

Bremsbeläge sind komplexe Reibmaterialien mit einem breiten Anforderungsprofil, das sich in drei Bereiche unterteilt: Reibtechnische Anforderungen: u.a. Reibwerthöhe und -stabilität, Nassreibwert, Initialfading und Verschleiß; Komfortverhalten: u.a. Pedalgefühl, Felgenverschmutzung und NVH (engl. Noise, Vibration, Harshness); sowie physikalisch-chemische Anforderungen: u.a. Kompressibilität, Wärmeleitfähigkeit, Scherfestigkeit und Ökologie [13, 14, 16].
Um die Anforderungen zu erfüllen, bestehen Bremsbeläge typischerweise aus bis zu 30 Komponenten, die sich wiederum in die vier Gruppen Matrix, Verstärkungsfasern, Füllstoffe und reibspezifische Additive unterteilen lassen [16]. Aufgrund der Vielzahl der Bestandteile und möglicher chemischer Reaktionen im Reibspalt während des Einsatzes, ist ein Bremsbelag ein sehr komplexes und heterogenes Werkstoffsystem. Jedem Element bzw. jeder Verbindung werden Einflüsse, Wechselwirkungen und Eigenschaften zugeordnet. Neue Belagsysteme mit der Vielzahl an Anforderungen zu entwickeln ist somit auch für etablierte Hersteller eine anspruchsvolle Aufgabe. In

Tabelle 2-1 sind die vier Gruppen, sowie ihre wichtigsten Vertreter und Aufgaben aufgeführt. Die Einteilung und Zuordnung der Materialien basiert auf der Belagentwicklung für Grauguss-Bremsscheiben. Die Möglichkeit eines uneingeschränkten Übertrags auf Aluminium-Bremsscheiben ist bisher nicht untersucht, aber allein durch die deutlichen Härteunterschiede zwischen Aluminium und Grauguss nicht zu erwarten.

Tabelle 2-1: Übersicht der wichtigsten Bestandteile in Bremsbelägen [13, 14, 16].

Gruppe	**Material (häufige Vertreter)**	**Funktion**
Matrix	Phenolharz, häufig mit Gummizusatz	Temperaturbeständiges Bindemittelgerüst
Verstärkungsfasern	Metall-, Kohlenstoff- und Glasfasern	Mechanische Stabilität und Festigkeit
Füllstoffe	Glimmer, Vermikulit, Bariumsulfat	Kostenreduktion und verbesserte Herstellbarkeit
Reibspezifische Additive	Graphit, Metallsulfide; Aluminiumoxid und Siliziumoxid	Einstellung und Stabilisierung des Reibwerts; Säubern der Reibfläche

Die Matrix aus Phenolharz stellt das Bindemittelgerüst für alle Belagkomponenten dar und sollte für die Anwendung auf Grauguss mit bis über 900 °C eine hohe Temperaturbeständigkeit besitzen. Um die Dämpfungseigenschaften zu verbessern, werden der Matrix zusätzlich Gummizusätze beigemischt. Die geringe Einsatztemperatur in Aluminium-Bremsscheiben reduziert die Anforderung der Temperaturstabilität an das Bindemittelgerüst des Bremsbelags und eröffnet neue Entwicklungsmöglichkeiten. Für die notwendige mechanische Festigkeit der Bremsbeläge werden Stahl-, Aramid-, Kohlenstoff- oder Glasfasern eingesetzt. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit metallischer Fasern werden diese in tangentialer oder radialer Richtung angeordnet, damit sich die Belagträgerplatte bzw. die Bremsflüssigkeit nicht zu stark erhitzt [17].

Zur Reduktion der Kosten, aber auch für die verbesserte Herstellung, werden Füllstoffe wie die Schichtsilikate Vermikulit oder Muskovit und auch pulverisierte Walnussschalen herangezogen. Die Hauptfunktion reibspezifischer Additive ist die Einstellung und Stabilisierung des Reibwerts durch Festkörperschmierstoffe wie Graphit

oder diverse Metallsulfide insbesondere bei hohen Temperaturen, aber auch durch abrasive Komponenten wie Aluminium- oder Siliziumoxid. Diese erhöhen den Reibwert und säubern die Grauguss-Reibfläche von gebildeten Oxiden oder Transferfilmen, führen aber zudem zu erhöhtem Verschleiß der Bremsscheibe [13, 16].
Der prozentuale Anteil der einzelnen Komponenten ist abhängig von der zugrundeliegenden Reibmaterialfamilie. Hierbei wird unterschieden zwischen Semimet mit einem Metallanteil (vorwiegend Eisen) von über 50 % ($\mu \leq 0{,}4$); Low Steel, die sich vor allem durch eine Mischung aus organischen und anorganischen Fasern und einem geringeren Eisenanteil auszeichnen ($\mu = 0{,}35 - 0{,}5$); Non Asbestos Organics (NAO), die weder Stahlwolle noch Eisenpulver und nur wenige abrasive Bestandteile enthalten ($\mu = 0{,}3 - 0{,}4$) und Hybrid-Bremsbelägen, die eine Mischung aus Low Steel- und NAO-Belägen darstellen. Jede dieser Reibmaterialfamilien hat ihre jeweilige Einsatzregion. Während zum Beispiel in den geschwindigkeitsbeschränkten Regionen USA und Asien vorwiegend NAO-Beläge aufgrund ihres guten Komfortverhaltens und dem geringen Verschleiß (Felgenverschmutzung) eingesetzt werden, kommen in Europa auf Grund der Anwendungsgebiete ohne Geschwindigkeitsbeschränkung vorwiegend hochleistungsfähige Low Steel-Bremsbeläge zum Einsatz [14].
Abbildung 2.3 zeigt die schematische Darstellung eines Bremsbelags, bestehend aus einer Belagträgerplatte, einer Zwischenschicht, der Reibmaterialmasse und je nach Konzept, auch aus Kolbenfedern. Als Sekundärmaßnahmen gegen NVH-Phänomene kann die Reibmaterialmasse angefast oder geschlitzt sein und es können Dämpfungsbleche oder Tilger-Massen verbaut werden.

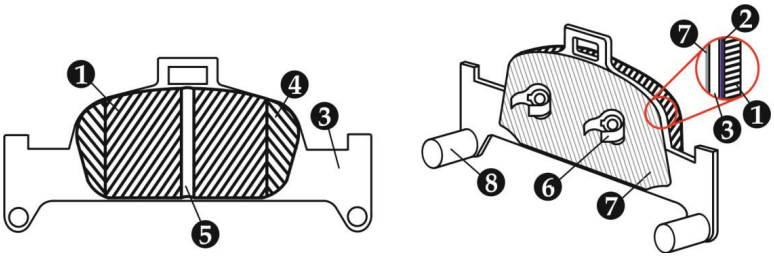

Abbildung 2.3: Schematische Darstellung eines Bremsbelags: 1 Reibmaterial, 2 Zwischenschicht, 3 Belagrückenplatte, 4 Belagfasung, 5 Schlitz, 6 Kolbenfeder, 7 Dämpfungsblech, 8 Tilger-Masse.

Die mechanische Belastung, die der Bremsbelag auf die Bremsscheibe ausübt, kann lokal sehr unterschiedlich sein. Durch das Einlaufen der tribologischen Paarung entstehen auf der Reibmaterialmasse langlebige Kontaktplateaus, die typischerweise einen maximalen Durchmesser von 100 - 500 µm besitzen und sich einige Mikrometer von der Umgebung abheben. Diese Kontaktplateaus nehmen nach *Eriksson* und

Jacobson ca. 15 - 20 % der Reibmaterialfläche ein. Die Fläche der realen Kontaktfläche hingegen ist kleiner und liegt auf den langlebigen Kontaktplateaus. Durch Verformung und Verschleiß sind diese realen Kontaktstellen in ständiger Veränderung und bilden sich bevorzugt an verschleißbeständigen Belagbestandteilen aus [12]. Es muss somit näherungsweise davon ausgegangen werden, dass die effektiven Druckverhältnisse in den Kontaktstellen mindestens um das Fünffache über dem nominellen Bremsdruck liegen. Die effektive Druckbelastung liegt im nominellen Bremsdruckbereich von 20 bis 150 bar somit bei ca. 6 bis 50 MPa.

2.1.2 Anforderungen an eine Bremsscheibe

Bremsscheiben müssen einer Vielzahl von unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden. Neben hoher Verschleiß- und akzeptabler Korrosionsbeständigkeit müssen sie einer hohen thermomechanischen Belastung standhalten. Hohe Aufheizraten und hohe Bremsscheibentemperaturen von mehreren hundert Grad sind insbesondere bei sportlicher Fahrweise eines Automobils mit Verbrennungsmotor keine Seltenheit. Da die rein mechanische Belastung meist im niedrigen zweistelligen (MPa) Druckspannungsbereich liegt und Grauguss auch im hohen Temperaturbereich eine ausreichende Stauchgrenze aufweist, stellt sie keine kritische Beanspruchung dar. Als deutlich kritischer zu betrachten ist die zyklische thermomechanische Belastung, die zu typischen radialen Rissen in der Reibfläche führen kann. Die entstehende Reibungswärme während des Bremsvorgangs erhitzt den Reibring aufgrund der eher geringen Wärmeleitfähigkeit des Graugusses (ca. 30 - 60 W/m·K) ungleichmäßig und erzeugt Ausdehnungsunterschiede, die wiederum zu thermischen Druckspannungen in tangentialer Richtung in der Reiboberfläche und zu Zugspannungen im kühleren Kern des Reibrings führen. Die Spannungen übersteigen die Stauchgrenze und resultieren in plastischer Verformung. Während der nachfolgenden Abkühlphase kommt es zu einer Umkehr von Druck- in Zugspannungen, die die Zugfestigkeit überschreiten und radiale Risse in der Reiboberfläche entstehen lassen (vgl. Abbildung 2.4) [18–22]. Die Entstehung thermischer Risse in Grauguss stellt einen bekannten und freigaberelevanten Schädigungsmechanismus dar [23–25].

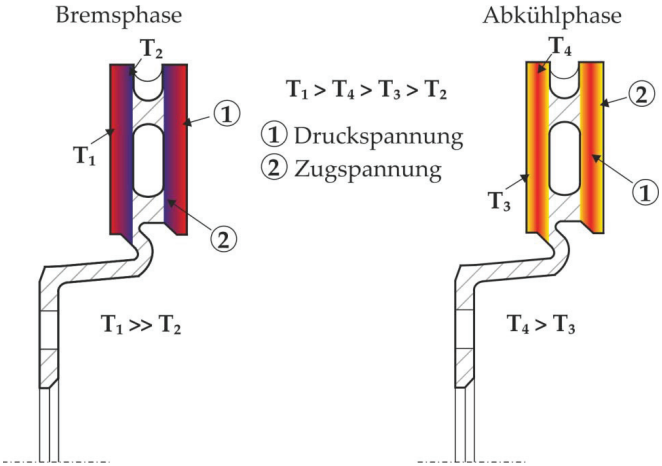

Abbildung 2.4: Entstehung thermischer Risse in einer Grauguss-Bremsscheibe, nach *Dietrich* [22].

Aluminium hingegen weist grundsätzlich eine geringere Stauchgrenze als Grauguss auf, was in der konstruktiven Auslegung und in der Festlegung der maximalen Einsatztemperatur berücksichtigt werden muss. In Abbildung 2.5 wird der Vergleich der Temperaturentwicklung einer Aluminium-Bremsscheibe und einer Grauguss-Bremsscheibe in einer FEM-Simulation gezeigt.

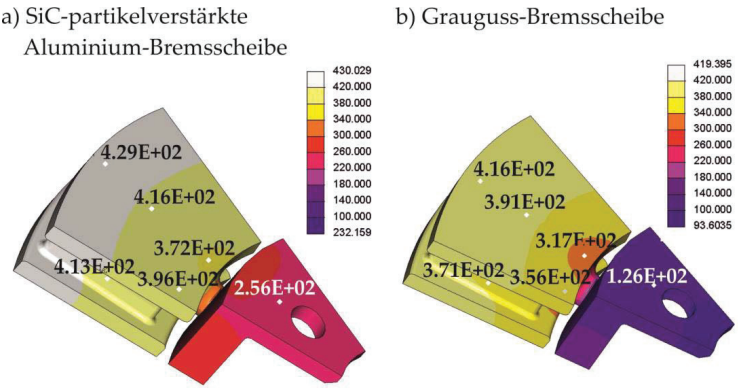

Abbildung 2.5: FEM-Simulation der Temperaturverteilung in einer Aluminium-Bremsscheibe (a) und einer Grauguss-Bremsscheibe (b) gleicher Geometrie zum Ende einer Bremsung [26].

Während die Grauguss-Bremsscheibe einen Temperaturunterschied von 24 % zwischen äußerstem und innerstem Messpunkt auf der Reibfläche aufweist, liegt der