

# **Neue Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben auf Basis metallischer Werkstoffe**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## **Dissertation**

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Florian Füllgrabe**  
aus Wolfsburg

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
Tag der Einreichung:	05. November 2012
Tag der mündlichen Prüfung:	15. Januar 2013

Darmstadt 2012

D 17



## Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, dem Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, für die hervorragende Betreuung dieser Arbeit, die kritischen fachlichen Diskussionen während der Bearbeitungszeit sowie die mir gewährten Freiheiten in der Forschung und beim Anfertigen dieser Arbeit.

Dem Gründer und ehemaligen Leiter von FZD, Prof. em. Dr.-Ing. Bert Breuer, danke ich für die kritischen Fragen und Anregungen in Gesprächen und während meiner Doktorandenseminare.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann, dem Leiter des Fachgebiets Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen, danke ich für die Übernahme des Korreferats und für die wertvollen Diskussionen und Hinweise zu meiner Forschungsarbeit.

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsprojekt erfolgte im Rahmen einer Kooperation mit der Firma Schwäbische Hüttenwerke Automotive. Für die intensive und stets konstruktive Zusammenarbeit möchte ich mich bei allen beteiligten Mitarbeitern herzlich bedanken. Insbesondere Herrn Ingo Hoffmann danke ich für seine fachliche wie auch freundschaftliche Begleitung.

Allen Mitarbeitern des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, einschließlich des Sekretariats sowie der mechanischen und elektrischen Werkstatt um Robert Korndörfer und Harald Bathke, danke ich herzlich für die Unterstützung und die äußerst angenehme und kollegiale Atmosphäre. Einen besonderen Dank möchte ich an dieser Stelle an die Mitarbeiter der mechanischen Werkstatt richten, ohne deren Einsatz in der Prototypfertigung die letzte Versuchsphase nicht möglich gewesen wäre.

Großer Dank gilt ebenso den vielen Studierenden, die im Rahmen studentischer Arbeiten sowie als wissenschaftliche Hilfskräfte zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Vielen Dank für Eure Unterstützung.

Bei meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und mich auf meinem Weg fortwährend unterstützt und begleitet haben, möchte ich mich herzlich bedanken. Ein besonderes Dankeschön möchte ich an meine liebe Frau Jennifer richten, die in den letzten Jahren zeitlich auf Vieles verzichten musste. Ihr Verständnis und ihr liebevoller Beistand gaben mir den nötigen Rückhalt diese Arbeit fertigzustellen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Formelzeichen und Indizes .....</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage und Motivation .....	1
1.2 Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2 Stand der Forschung und Technik.....</b>	<b>5</b>
2.1 Leichtbauansätze.....	5
2.2 Bauarten von Brems scheiben .....	8
2.2.1 Begriffsdefinitionen .....	8
2.2.2 Einteilige Brems scheiben aus Grauguss .....	9
2.2.3 Brems scheiben in Leichtbauweise .....	11
2.3 Fertigung von Brems scheiben .....	21
2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	23
<b>3 Zielsetzung und Methodik der Arbeit .....</b>	<b>26</b>
3.1 Forschungsbedarf und Zielformulierung .....	26
3.2 Methodik.....	27
<b>4 Funktionale Grundlagen von Scheibenbremsen .....</b>	<b>29</b>
4.1 Wirkungskette in einer Pkw-Bremsanlage.....	29
4.2 Funktionsbeschreibung von Scheibenbremsen.....	32
4.2.1 Prozessmodell darstellung der Scheibenbremse .....	32
4.2.2 Eigenschaftsanalyse der Hauptfunktionen einer Brems scheibe .....	34
4.2.3 Einfluss von Stör- und Nebengrößen .....	39
4.2.4 Funktionsstruktur einer Brems scheibe – Zerlegung in Teilfunktionen.....	43
4.3 Fazit .....	45
<b>5 Systematik von Brems scheiben .....</b>	<b>46</b>
5.1 Randbedingungen und Struktur .....	46
5.1.1 Randbedingungen .....	46
5.1.2 Kriterien zur Klassifizierung und Strukturierung .....	46
5.2 Abgeleitete Brems scheibensystematik .....	51
5.2.1 Gewählte Systematisierungsmethodik .....	51
5.2.2 Komponentenebene.....	52
5.2.3 Funktionsebene .....	53

5.2.4	Verbindungsebene.....	58
5.3	Fazit.....	60
<b>6</b>	<b>Simulative Analyse der thermischen Bremsscheibenfunktionen.....</b>	<b>62</b>
6.1	Thermisches Modell der Bremsscheibe.....	62
6.1.1	Zielsetzung und Anforderungen.....	62
6.1.2	Modellierungswerkzeug und Modellarchitektur.....	63
6.1.3	Modellprüfung.....	66
6.1.4	Fazit.....	74
6.2	Parameteranalyse – Ergebnisse der thermischen Simulation.....	75
6.2.1	Temperaturverteilung in der Bremsscheibe bei Variation von Werkstoff und Geometrie.....	76
6.2.2	Abkühlzeit der Reibringoberfläche bei Variation von Werkstoff und Geometrie.....	81
6.2.3	Fazit und Schlussfolgerung.....	82
<b>7</b>	<b>Konzeptauswahl.....</b>	<b>83</b>
<b>8</b>	<b>Umformend hergestellte Leichtbau-Bremsscheibe.....</b>	<b>87</b>
8.1	Grundlagen der Prozesse Drücken und Drückwalzen.....	87
8.2	Prototypische Umsetzung.....	88
8.2.1	Konzeptauslegung.....	89
8.2.2	Prototypenfertigung.....	94
8.3	Ergebnisse der Validierungsversuche.....	96
8.3.1	Mechanische Festigkeit und Rissbildung.....	98
8.3.2	Thermisches Verhalten.....	99
8.3.3	Verformungsverhalten unter thermomechanischer Last.....	102
8.4	Fazit und Potenzial für weiterführende Untersuchungen.....	103
<b>9</b>	<b>Reibgeschweißte Leichtbau-Bremsscheibe.....</b>	<b>105</b>
9.1	Grundlagen des Reibschweißens.....	105
9.2	Prototypische Umsetzung.....	106
9.2.1	Konzeptauslegung.....	107
9.2.2	Prototypenfertigung.....	110
9.3	Ergebnisse der Validierungsversuche.....	112
9.3.1	Mechanische Festigkeit und Rissbildung.....	113
9.3.2	Thermisches Verhalten.....	114
9.3.3	Verformungsverhalten unter thermomechanischer Last.....	117
9.4	Fazit und Potenzial für weiterführende Untersuchungen.....	119
<b>10</b>	<b>Leichtbau-Bremsscheibe in Hybridbauweise.....</b>	<b>123</b>
10.1	Identifizierte Herausforderungen.....	123

10.1.1 Anforderungen aus mechanischen Funktionsumfängen .....	123
10.1.2 Anforderungen aus thermischen Funktionsumfängen .....	124
10.1.3 Anforderungen aus Einflüssen von Stör- und Nebengrößen .....	124
10.2 Thermische Auslegung auf Basis von Simulationsdaten.....	126
10.3 Prototypische Umsetzung .....	129
10.4 Prüfstandsversuche .....	131
10.4.1 Versuchsaufbau und durchgeführte Versuche .....	131
10.4.2 Versuchsergebnisse .....	133
10.5 Fazit und weiterführende Untersuchungen .....	138
<b>11 Fazit und Ausblick .....</b>	<b>140</b>
11.1 Ergebnisse.....	140
11.2 Ausblick.....	143
<b>12 Zusammenfassung.....</b>	<b>146</b>
<b>13 Anhang .....</b>	<b>148</b>
13.1 Darstellung der Patentrecherche .....	148
13.2 Einteilung der Fügeverfahren .....	150
13.3 Werkstoffdaten.....	151
13.4 Thermisches Simulationsmodell.....	152
13.4.1 Modellaufbau – Einbindung der Wärmeübergangsmechanismen .....	152
13.4.2 Modellprüfung – Gewähltes Versuchsszenario.....	159
13.4.3 Parameteranalyse – Gewählte Versuchsszenarien.....	160
13.4.4 Parameteranalyse – Gesamtdarstellung der Ergebnisse.....	161
13.4.5 Modellerweiterung für die reibgeschweißte Leichtbau-Bremsscheibe.....	167
13.5 Versuchsbedingungen .....	168
13.5.1 Eingesetzte Bremsenprüfstände .....	168
13.5.2 Versuchsparameter der verwendeten Prüfzenarien.....	169
13.6 Vereinfachtes Prozessschaubild der umformend hergestellten Leichtbau- Bremsscheibe .....	170
13.7 Ergänzende Versuchsergebnisse zur Hybrid-Bremsscheibe .....	171
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>173</b>
<b>Eigene Veröffentlichungen und Patentanmeldungen .....</b>	<b>181</b>
<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>182</b>

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
A	Anbindung
CAD	Computer-Aided Design
CMC	Ceramic Matrix Composite
CVD	Chemical Vapor Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTV	Disc Thickness Variation
EN	Europäische Norm
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
GG	Grauguss
GJL	Gusseisen mit Lamellengraphit
HA	Hinterachse
HBS	Hybrid-Bremsscheibe
ICE	Intercity-Express
IPC	International Patent Classification
ISO	International Organization for Standardization
KK	Kühlkanal
LSO	Low-steel organic
MMC	Metal Matrix Composite
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NSO	Non-steel organic
NVH	Noise Vibration Harshness
PEO	Plasma-elektrolytische Oxidation
PKD	Polykristalliner Diamant
Pkw	Personenkraftwagen
RR	Reibring
TA	Topfanbindung
VA	Vorderachse
VE	Verschleißelement

VW            Volkswagen

## Formelzeichen und Indizes

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$a$	$m/s^2$	Beschleunigung
$\alpha$	$m^2/s$	Temperaturleitfähigkeit
$A$	$m^2$	Fläche
$a_{Mat}$	$m$	Materialvorlauf
$A_p$	$m^2$	Projizierte Fläche an der Zahnflanke
$A_\tau$	$m^2$	Projizierte Fläche im Zahngrund
$b$	$m$	Profilelementbreite
$c$	$J/kgK$	Spezifische Wärmekapazität
$C$	$J/K$	Wärmekapazität
$c_A$	$kN/m$	Aufbaufedersteifigkeit
$c_R$	$kN/m$	Reifenfedersteifigkeit
$c_w$	-	Luftwiderstandsbeiwert
$d$	$m$	Abstand
$D$	$m/s^2$	Verzögerung
$d_A$	$Ns/m$	Aufbaudämpfung
$D_{Kanal}$	$m$	Durchmesser des Kanals
$D_0$	$m$	Außendurchmesser des Reibrings
$D_1$	$m$	Innendurchmesser des Reibrings
$E$	$J$	Energie
$E_{BS,AZ}$	$J$	Energiezustand der Bremsscheibe, Systemausgang
$E_{BS,EZ}$	$J$	Energiezustand der Bremsscheibe, Systemeingang
$E_{kin}$	$J$	Kinetische Energie
$e_m$	-	Massenzuschlagsfaktor
$E_{pot}$	$J$	Potenzielle Energie
$E_{rot}$	$J$	Rotatorische Energie
$F$	$N$	Kraft
$f_R$	-	Radwiderstandsbeiwert
$F_W$	$N$	Widerstandskraft
$\hat{F}_z$	$N$	Radlastamplitude
$g$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
$h$	$m$	Höhe, Profilelementhöhe
$\hat{h}$	$m$	Unebenheitsamplitude

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$k$	m	Wandstärke Reibringkörper
$K_{VA}$	%	Anteil der Bremskraft an der Vorderachse (statisch)
$l$	m	Profilelementlänge
$L$	m	Länge
$L_{char.}$	m	Charakteristische Länge
$L_{Kanal}$	m	Länge des Kanals
$m$	kg	Masse
$M$	Nm	Moment
$n$	-	Anzahl Profilelemente
$n_{max}$	1/min	Maximale Drehzahl
$Nu$	-	Nusselt-Zahl
$p$	N/mm <sup>2</sup>	Flächenpressung
$P$	W	Leistung
$p_B$	Pa	Bremsdruck
$p_{hydr.}$	Pa	Hydraulischer Druck
$Pr$	-	Prandtl-Zahl
$q$	-	Steigungsmaß
$\dot{q}$	W/m	Wärmestromdichte
$Q$	J	Wärme
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$r$	m	Radius
$R$	K/W	Wärmeleitwiderstand
$r_{dyn}$	m	Dynamischer Reifenhalbmesser
$r_{eff}$	m	Effektiver Reibradius
$R_{p0,1}$	N/mm <sup>2</sup>	0,1 %-Dehngrenze
$R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	0,2 %-Dehngrenze
$r_1$	m	Innenradius Reibringfügefläche
$r_2$	m	Innenradius Bremsscheibentopf
$r_3$	m	Außenradius Reibringfügefläche
$r_4$	m	Außenradius Bremsscheibentopf
$Ra$	-	Rayleigh-Zahl
$Re_t$	-	Reynolds-Zahl für parallelen Luftfluss
$Re_0$	-	Reynolds-Zahl für Rotation
$S$	-	Sicherheitsfaktor
$s_{Blech}$	m	Dicke des Funktionsblechs
$S_p$	-	Sicherheitsfaktor bezogen auf die zulässige Flächenpressung
$S_\tau$	-	Sicherheitsfaktor bezogen auf die zulässige Schubspannung

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$s_0$	m	Wandstärke Ronde
$s_l$	m	Wandstärke Bremsscheibentopf
$t$	s	Zeit
$T$	K, °C	Temperatur
$T_W$	K	Wandtemperatur
$T_{W1}$	K	Temperatur der wärmeren Wandfläche $W_1$
$T_{W2}$	K	Temperatur der kälteren Wandfläche $W_2$
$T_\infty$	K	Temperatur außerhalb der Grenzschicht
$v_{Fzg.}$	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{Kühl\_avg.}$	m/s	Durchschnittliche Geschwindigkeit des Luftstroms im Kühlkanal
$v_{rel}$	m/s	Relativgeschwindigkeit
$v_0$	m/s	Start-/Ausgangsgeschwindigkeit
$VarK$	%	Variationskoeffizient
$W_T$	m <sup>3</sup>	Torsionswiderstandsmoment
$\ddot{x}$	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigung
$\hat{z}$	m/s <sup>2</sup>	Amplitude der Vertikalbeschleunigung
$\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	Wärmeübergangskoeffizient
$\gamma$	%	Anteil der von der Bremsscheibe aufgenommenen Bremsenergie
$\Delta$	diverse	Differenz
$\varepsilon$	-	Emissionsgrad
$\eta$	-	Wirkungsgrad
$\theta$	kgm <sup>2</sup>	Trägheitsmoment
$\theta_{max}$	kgm <sup>2</sup>	Maximale Schwungmasse
$\lambda$	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
$\mu$	-	Reibwert
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	Kinematische Viskosität der Luft
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\sigma$	J	Standardabweichung
$\sigma_{zul}$	N/mm <sup>2</sup>	Zulässige Spannung
$\tau_{Abkühl}$	s	Abkühlkonstante
$\tau_{max}$	N/mm <sup>2</sup>	Maximale Schubspannung
$\tau_{zul}$	N/mm <sup>2</sup>	Zulässige Schubspannung
$\varphi_v$	%	Formfüllungsfaktor
$\omega$	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
<i>0</i>	Start-/Ausgangs-
<i>A</i>	Aufbau
<i>ab</i>	abgeführt
<i>außen</i>	Außen-
<i>AZ</i>	Ausgangszustand
<i>Bet</i>	Betätigung
<i>Blech</i>	Auf das Funktionsblech bezogen
<i>Brems</i>	Brems-
<i>bs</i>	Bremsscheibe (Energieanteil der Bremsung)
<i>BS</i>	Bremsscheibe
<i>erzw</i>	erzwungen (Konvektion)
<i>EZ</i>	Eingangszustand
<i>frei</i>	frei (Konvektion)
<i>frei_Platte</i>	frei, vertikale Platte (Konvektion)
<i>frei_Zyl</i>	frei, horiz. Zylinder (Konvektion)
<i>Fuß</i>	Fuß-
<i>Fzg.</i>	Fahrzeug
<i>gesamt</i>	Gesamt-
<i>HA</i>	Hinterachse
<i>HBZ</i>	Hauptbremszylinder
<i>i</i>	Index für Komponente im Modell
<i>innen</i>	Innen-
<i>K</i>	Kontaktfläche
<i>kin</i>	kinetisch
<i>Kolben</i>	Kolben
<i>komb</i>	kombiniert
<i>Konv</i>	Konvektion
<i>L</i>	Luft
<i>Leit</i>	Leitung
<i>max</i>	maximal
<i>N</i>	Normal
<i>pot</i>	potenziell
<i>q</i>	Quelle
<i>R</i>	Rad
<i>rel</i>	relativ
<i>rot</i>	rotatorisch
<i>RR</i>	Reibring(-körper)
<i>S</i>	Schlepp

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
<i>Sp</i>	Spann-
<i>Strahl</i>	Strahlung
<i>therm.</i>	thermisch
<i>T<sub>i</sub></i>	Teilkomponente mit dem Index <i>i</i>
<i>TO</i>	Topf
<i>turb</i>	turbulent
<i>U</i>	Umgebung
<i>Umfang</i>	Umfang
<i>VA</i>	Vorderachse
<i>Verz.</i>	Verzögerung
<i>W<sub>1</sub></i>	Wärmere Wandfläche 1
<i>W<sub>2</sub></i>	Kältere Wandfläche 2
<i>zu</i>	zugeführt
<i>zul</i>	zulässig

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Motivation

Die knapper werdenden Ressourcen fossiler Energieträger haben in Verbindung mit den verstärkten Limitierungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Gesetzgeber den Druck auf die Automobilbranche in Bezug auf die Umsetzung verbrauchssenkender Maßnahmen erhöht. In den vergangenen Jahren konnten trotz steigender Kilometerfahrleistungen die CO<sub>2</sub>-Straßenverkehrsemissionen in Deutschland bereits durch verschiedene Entwicklungsstrategien wie Motor-Downsizing gesenkt werden.<sup>1</sup> Die Einhaltung zukünftiger CO<sub>2</sub>-Grenzwerte (< 100 g CO<sub>2</sub>/km bis 2020)<sup>2</sup> erfordert weitere Maßnahmen, um den Kraftstoffverbrauch und somit die Emissionen zu senken. Neben einer Effizienzsteigerung der Verbrennungsmotoren stellt die Senkung der Fahrwiderstände durch Reduzierung der Fahrzeugmasse  $m_{Fzg.}$  einen wesentlichen Ansatz zur Verbrauchsreduktion dar (vgl. Gleichung (1.1)). Mit Ausnahme des Luftwiderstandes sind alle Fahrwiderstandsanteile von der Masse des Fahrzeugs abhängig.

$$F_W = m_{Fzg.} \cdot g \cdot \left( f_R + q + e_m \cdot \frac{\ddot{x}}{g} \right) + c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v_{rel}^2 \quad (1.1)$$

Auf Basis des Neuen Europäischen Fahrzyklus' (NEFZ) ergibt eine Abschätzung des massebedingten Fahrwiderstandes nach Gleichung (1.1) einen Wert von 0,2 bis 0,3 N/kg und ermöglicht eine erste Aussage über das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial. Aus einer Reduzierung der Fahrzeugmasse um 10 kg resultiert somit eine Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von etwa 1 g CO<sub>2</sub>/km, was durch die in der Literatur angegebenen Werte im Bereich von 0,7 bis 1,3 g CO<sub>2</sub>/km gestützt wird.<sup>3,4</sup>

Durch Anwendung verschiedener Leichtbaustrategien konnten in der Vergangenheit insbesondere in den Bereichen Karosserie und Fahrwerk, die typischerweise etwa die Hälfte der Fahrzeugmasse bilden (vgl. Abbildung 1.1, links), bereits deutliche Masseneinsparungen erreicht werden. Die Analyse der Massenverteilung im Fahrwerk zeigt, dass der Anteil der Bremssystemkomponenten, deren Masse vor allem durch Bremsattel und Bremsscheibe bestimmt wird, bis zu 20 % der Fahrwerkgesamtmasse

<sup>1</sup> VDA – Verband der Automobilindustrie: Handeln für den Klimaschutz

<sup>2</sup> VERORDNUNG (EG) Nr. 443/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES

<sup>3</sup> Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion, 2009, S. 1

<sup>4</sup> Friedrich, H. E.: ATZ – Leichtbau und Werkstoffinnovationen im Fahrzeugbau, 2002, S. 259

(vgl. Abbildung 1.1, rechts) beträgt. Für die Radaufhängung eines Fahrzeugs der Kompaktklasse wird der Anteil der Radbremse mit bis zu annähernd 40 % angegeben.<sup>5</sup>

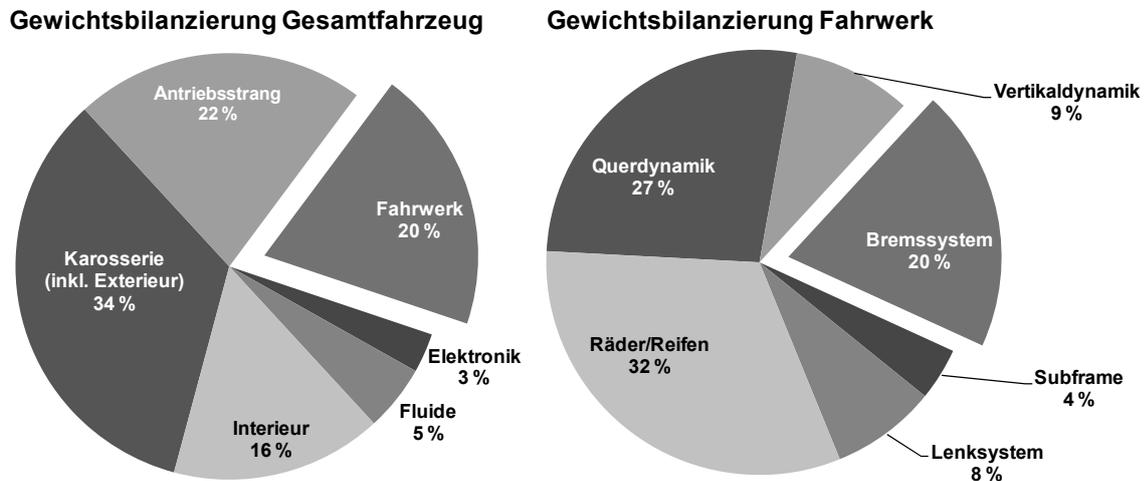


Abbildung 1.1: Massenbilanz im Gesamtfahrzeug (links) und bezogen auf den Bereich Fahrwerk (rechts)<sup>6</sup>

Bezogen auf die Bremsscheibe sind durch Leichtbau neben einer Reduzierung der Masse weitere Vorteile zu erwarten. Mit der Senkung des Drehmassenzuschlagsfaktors  $e_m$  (siehe Gleichung (1.1)) erfolgt eine zusätzliche Reduzierung des massebedingten Fahrwiderstands. Zudem werden die reifengefederten Massen gesenkt, wodurch eine positive Beeinflussung der Fahrzeug-Vertikaldynamik ermöglicht wird. Eine geringere reifengefederte Masse beeinflusst die bewertete Schwingstärke positiv durch Anhebung der Radeigenfrequenz und führt zudem zu einer Senkung der Radlastschwankungen, was in Abbildung 1.2 dargestellt ist.

---

<sup>5</sup> Eichhorn, U.; Fuhrmann, K. H.: Fahrzeugtechnische Anforderungen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 31

<sup>6</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an: Eckstein, L.; Göbbels, R.; Goede, M.; Laue, T.; Wohlecker, R.: ATZ – Analyse sekundärer Gewichtseinsparpotenziale in Kraftfahrzeugen, 2011, S. 69

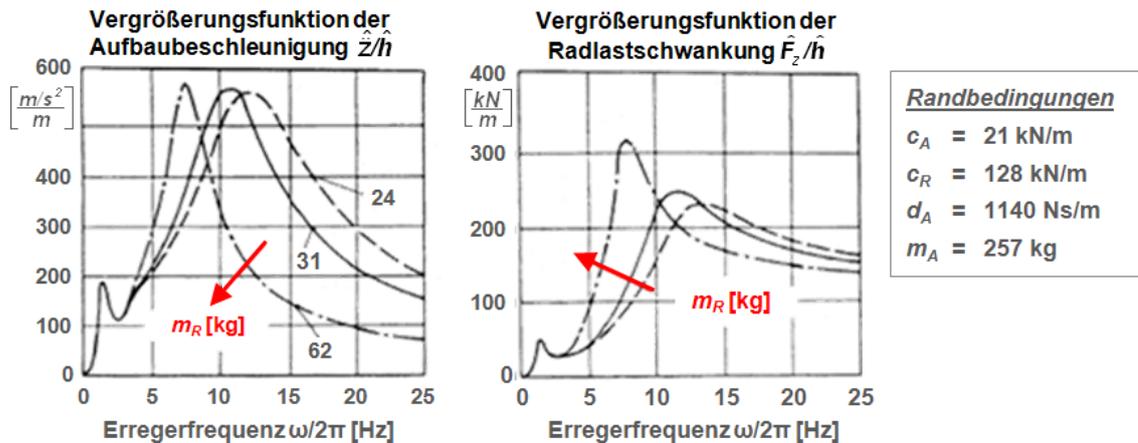


Abbildung 1.2: Einfluss der reifengefederten Masse auf die Amplitude der komfortrelevanten Aufbaubeschleunigung (links) und fahrsicherheitsrelevanten Radlastschwankung (rechts) in Abhängigkeit der Erregerfrequenz<sup>7</sup>

Zur Senkung der Bremsscheibenmasse existieren unterschiedliche Lösungen im Serien-einsatz, die auf einer Kombination verschiedener Leichtbauansätze aufbauen (vgl. Kapitel 2.2.3). Bei diesen wird der aufgrund seines ausgewogenen Eigenschaftsprofils und der geringen Kosten bewährte, aber vergleichsweise schwere Graugusswerkstoff teilweise oder auch vollständig durch Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium oder keramische Verbundwerkstoffe ersetzt. Durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen steigen die Kosten im Vergleich zu einer einteiligen Bremsscheibe aus Grauguss. Dies resultiert aus höheren Rohstoffkosten für die verwendeten Werkstoffe sowie zumeist aufwändigeren und kostenintensiveren Fertigungsverfahren als Folge der in der Regel mehrteiligen Ausführung von Leichtbau-Bremsscheiben. Aufgrund dieser Tatsache und des hohen Kostendrucks im Kleinwagen- und Mittelklassensegment ist der Einsatz von Leichtbau-Bremsscheiben bisher zumeist auf Fahrzeuge der Ober- bzw. Luxusklasse sowie Sportwagen begrenzt.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Aufbauend auf der in diesem Kapitel dargestellten Ausgangslage und der Motivation zu den Themen Leichtbau im Fahrzeug und im Speziellen in der Bremsscheibe, erfolgt in *Kapitel 2* eine detaillierte Analyse zum Stand der Technik und Forschung auf dem Gebiet der Bremsscheiben, um den Forschungsbedarf zu konkretisieren. Bevor die verschiedenen bestehenden Lösungsansätze vorgestellt und unter Berücksichtigung funktionaler und fertigungstechnischer Aspekte diskutiert werden, wird zum besseren

<sup>7</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an: Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Teil B: Schwingungen, 2004, S. 349

Verständnis eine Übersicht über die prinzipiellen Leichtbauansätze sowie Begriffsdefinitionen zum Aufbau einer Bremsscheibe gegeben. Aus den Erkenntnissen zum Stand der Technik und Forschung wird in *Kapitel 3* die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit abgeleitet und eine Methodik zur Zielerreichung definiert. Ausgehend von der Funktionsbeschreibung einer Bremsscheibe und der Analyse der Teilfunktionen in *Kapitel 4*, wird in *Kapitel 5* der Lösungsraum für Bremsscheiben unter Einbeziehung zuvor definierter Strukturmerkmale systematisiert. Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte thermische Simulationsmodell zur Auslegung und Bewertung verschiedener Bremsscheibenkonzepte wird in Verbindung mit den Ergebnissen einer thermischen Parameteranalyse in *Kapitel 6* vorgestellt. Unter Berücksichtigung der Anforderungen an Leichtbau, Funktion und Fertigung werden in *Kapitel 7* aufbauend auf dem erstellten Lösungsraum sowie den Ergebnissen der thermischen Simulation drei zu realisierende Bremsscheibenkonzepte abgeleitet. Die Konkretisierung der Konzepte und die Prüfung der Validität anhand geeigneter Versuchsszenarien erfolgt in den *Kapiteln 8–10*. Vor dem Hintergrund der gewonnenen Erkenntnisse wird in *Kapitel 11* ein abschließendes Fazit gezogen und ein Ausblick gegeben. Die Zusammenfassung der Arbeit erfolgt in *Kapitel 12*.

## 2 Stand der Forschung und Technik

Im vorliegenden Kapitel 2 wird ausgehend von der Charakterisierung allgemeiner Leichtbauweisen der Stand der Technik und Forschung auf dem Gebiet der Bremsscheiben diskutiert. Nach einer Begriffsdefinition der Teilkomponenten einer Bremsscheibe wird zunächst auf die einteilige Bremsscheibe aus Grauguss als Standardkonzept für den heutigen Einsatz in Pkw eingegangen. Darauf aufbauend werden verschiedene Leichtbaukonzepte für Bremsscheiben vor dem Hintergrund funktionaler und wirtschaftlicher Eigenschaften diskutiert und in einem abschließenden Fazit vergleichend gegenübergestellt. Eine Übersicht der Patentsituation ist ergänzend zu den Ausführungen in diesem Kapitel in Anhang 13.1 dargestellt.

### 2.1 Leichtbauansätze

Der Leichtbau als Methode zur Erreichung funktionaler oder ökonomischer Ziele ist gekennzeichnet durch die Senkung des Eigengewichts einer Konstruktion bei gleichzeitig bestmöglicher Werkstoffausnutzung.<sup>8,9</sup> Die Randbedingungen und Restriktionen der Konstruktionsaufgabe werden aus den verschiedenen Anforderungen an das Bauteil bzw. an die Konstruktion abgeleitet. Hierzu zählen sicherheitsrelevante Aspekte wie eine ausreichende Betriebsfestigkeit und Lebensdauer, wodurch Werkstoffauswahl und Geometrie beeinflusst werden. Auch fertigungstechnische Aspekte oder die Reparaturfreundlichkeit einer Konstruktion beeinflussen die Gestaltung.<sup>10,11</sup>

Neben der funktionalen Betrachtung ist bei Leichtbaukonstruktionen aus ökonomischer Sicht das Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen zu berücksichtigen. Beispiele für den Aufwand sind in diesem Zusammenhang der Material- oder Fertigungsaufwand, der durch die Kosten als messbare, aber zeitlich variable Größe<sup>12</sup>, quantifiziert werden kann. Demgegenüber steht der Nutzen der Leichtbaumaßnahme, der zumeist mit den

---

<sup>8</sup> Wiedemann, J.: Leichtbau, 2007, S. 1 f.

<sup>9</sup> Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion, 2009, S. 1

<sup>10</sup> Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion, 2009, S. 9, S. 17

<sup>11</sup> Wiedemann, J.: Leichtbau, 2007, S. 9

<sup>12</sup> Wiedemann, J.: Leichtbau, 2007, S. 471

Anforderungen verknüpft ist und in der Praxis beispielsweise eine Energieeinsparung oder die Realisierung einer Systemfunktion darstellt.<sup>13</sup>

Zur Erreichung der technischen und wirtschaftlichen Ziele existieren verschiedene Konstruktionsstrategien und Leichtbauweisen. Zu den Strategien gehören der *Form-*, *Stoff-* und *Fertigungsleichtbau*, deren Merkmale in Anlehnung an Klein<sup>14</sup> in Tabelle 2.1 dargestellt sind.

Tabelle 2.1: Konstruktionsstrategien im Leichtbau

<b>Konstruktionsstrategien</b>	
<i>Formleichtbau</i>	Einsatz leichtbauförderlicher Konstruktionsprinzipien durch geeignete Profilgeometrien und eindeutige Kraftleitpfade
<i>Stoffleichtbau</i>	Substitution schwerer Werkstoffe durch Leichtbauwerkstoffe
<i>Fertigungsleichtbau</i>	Funktionsintegration (Einstückigkeit) durch geringen Materialeinsatz und minimale Verbindungsstellen

Aufbauend auf den Strategien stehen dem Konstrukteur verschiedene Leichtbauweisen zur Verfügung, die nach ihren technologischen Merkmalen und Bedingungen eingeteilt sind. Die Wahl der Bauweise wird im Allgemeinen vom Anwendungsfall und den daraus resultierenden technischen und wirtschaftlichen Anforderungen bestimmt. Vor allem im Maschinen- und Fahrzeugbau sind die Grenzen für die technischen Lösungen und den darin realisierbaren Leichtbaugrad infolge der Kostengesetzmäßigkeiten häufig sehr eng gesteckt.<sup>15</sup> In Tabelle 2.2 ist aufbauend auf den Ausführungen von Klein<sup>16</sup> und Wiedemann<sup>17</sup> eine Übersicht der bekannten Leichtbauweisen mit Vor- und Nachteilen dargestellt. Der Vergleich der verschiedenen Leichtbauweisen mit den Konstruktionsstrategien zeigt die Wechselwirkungen in den Bereichen technischer und wirtschaftlicher Fragestellungen. Es wird deutlich, dass die Anwendung einer Leichtbauweise häufig durch eine Nutzung mehrerer Konstruktionsstrategien gekennzeichnet ist.

---

<sup>13</sup> Wiedemann, J.: Leichtbau, 2007, S. 2

<sup>14</sup> Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion, 2009, S. 3

<sup>15</sup> Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion, 2009, S. 3

<sup>16</sup> Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion, 2009, S. 17 ff.

<sup>17</sup> Wiedemann, J.: Leichtbau, 2007, S. 7 f.

Tabelle 2.2: Leichtbauweisen<sup>18,19</sup>

<b>Differenzialbauweise</b>	
Additive, punktuelle Verbindung der Einzelbauteile durch Verbindungselemente	
<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Möglichkeit der Werkstoffkombination</li> <li>▪ Gute Fail-Safe-Qualitäten, Bohrungen und Querschnittsübergänge können den Rissfortschritt stoppen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zusätzl. Masse durch Materialdopplungen</li> <li>▪ Kerbwirkung</li> <li>▪ Korrosionsverhalten (z.B. Kontaktkorrosion bei Einsatz verschiedener Werkstoffe)</li> </ul>
<b>Integralbauweise</b>	
Minimierung der strukturbildenden Einzelteile, Einstückigkeit	
<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Realisierung von Funktionen über die Formgebung</li> <li>▪ Gleicher Materialeinsatz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Werkstoff und Werkzeugkosten</li> <li>▪ Schädigungsverhalten, Durchwandern von Rissen</li> </ul>
<b>Integrierende Bauweise</b>	
Einzelelemente, die zu einer organischen Einheit verbunden werden. Teilintegration, um die Nachteile der Integralbauweise zu umgehen.	
<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzung der positiven Eigenschaften von Integral- und Differenzialbauweise</li> <li>▪ Probleme bezüglich Kerben, Korrosion oder Rissausbreitung können durch definierte Schnittstellen reduziert oder vermieden werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gegebenenfalls aufwändige Reparaturen</li> </ul>
<b>Verbundbauweise</b>	
Hochintegrative Bauweise, gekennzeichnet durch die Kombination verschiedener Materialien.	
<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzung der spezifischen Vorteile der Werkstoffe</li> <li>▪ Möglichkeit der Funktionstrennung (z.B. Faserverbundkonstruktionen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufwändige Fertigung/Fügungen</li> <li>▪ Korrosionsverhalten (z.B. Kontaktkorrosion bei Einsatz verschiedener Werkstoffe)</li> </ul>

<sup>18</sup> Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion, 2009, S. 17 ff.

<sup>19</sup> Wiedemann, J.: Leichtbau, 2007, S. 7 f.

## 2.2 Bauarten von Bremscheiben

Die Dokumentation des Standes der Technik erfolgt aufbauend auf den verschiedenen Bauarten von Bremscheiben ausgehend von der typischen einteiligen Bremscheibe aus Grauguss als Basis. Die Unterteilung orientiert sich an den verwendeten Werkstoffen bzw. Werkstoffpaarungen. Neben Aufbau und werkstofftechnischen Eigenschaften werden die Konzepte vor dem Hintergrund ihrer funktionalen Eigenschaften diskutiert, wobei auch das Herstellverfahren betrachtet wird.

### 2.2.1 Begriffsdefinitionen

Zur Gewährleistung der Eindeutigkeit erfolgt in diesem Abschnitt die Festlegung der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Bezeichnungen für die Bauarten von Bremscheiben sowie deren Teilkomponenten. Eine detaillierte Betrachtung der Teilkomponenten und deren Funktionalitäten erfolgt in Kapitel 4. Ein wesentliches, die Bauart charakterisierendes Differenzierungsmerkmal von Bremscheiben ist die Art der Belüftung (siehe Abbildung 2.1).

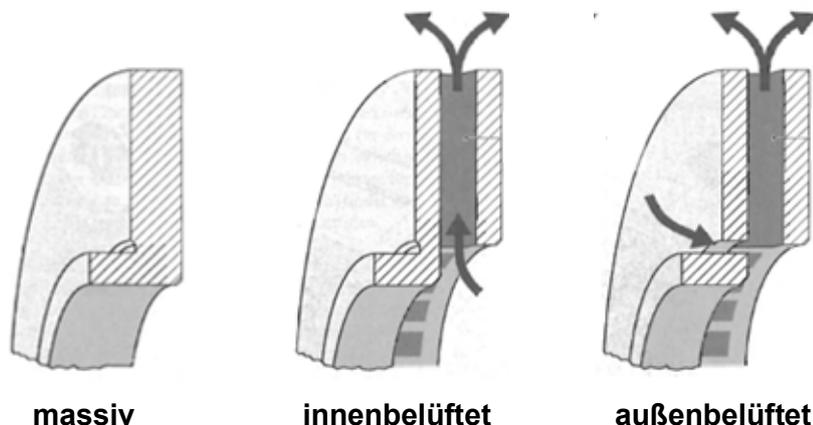


Abbildung 2.1: Belüftungsarten von Bremscheiben<sup>20</sup>

Allgemein wird zwischen nicht belüfteten (massiven) Bremscheiben und belüfteten Bremscheiben unterschieden. Massive Bremscheiben stellen mit einem Reibring die einfachste Ausführung einer Bremscheibe dar. Belüftete Bremscheiben hingegen verfügen über zwei Reibringe, die über einen Kühlkanal miteinander verbunden sind. Die Vorteile der belüfteten Bremscheiben liegen in einer höheren Wärmekapazität sowie einer besseren Abkühlung durch die luftdurchströmten Kühlkanäle.<sup>21</sup> Abhängig

---

<sup>20</sup> In Anlehnung an: Reif, K. (Hrsg.): Bremsen und Bremsregelsysteme, 2010, S. 81

<sup>21</sup> Reif, K. (Hrsg.): Bremsen und Bremsregelsysteme, 2010, S. 81

von der Anströmrichtung wird zwischen außenbelüfteten (Lufteintritt radseitig) und innenbelüfteten (Lufteintritt fahrzeugseitig) Bremscheiben unterschieden.

Abbildung 2.2 zeigt die Schnittansicht einer innenbelüfteten Bremscheibe mit der Zuordnung zwischen den Teilkomponenten und den dazugehörigen Bezeichnungen. Belüftete Bremscheiben bestehen aus zwei Reibringen (1) (2), die über die Stege des Kühlkanals (3) miteinander verbunden sind. Alle drei Teilkomponenten bilden zusammen den Reibringkörper, der über die Anbindung / den Topfhals (4) an den Topf (5) angebunden ist.

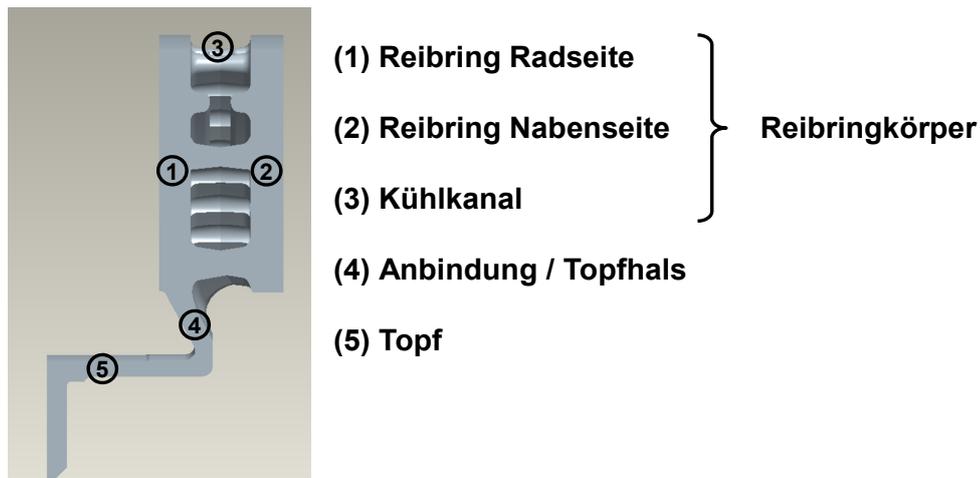


Abbildung 2.2: Bezeichnung der Teilkomponenten einer Bremscheibe in der vorliegenden Arbeit

## 2.2.2 Einteilige Bremscheiben aus Grauguss

Mit Einführung der Scheibenbremse in den 60er Jahren hat sich die Bremscheibe auf Basis von Graugusswerkstoffen zum Standard in der Pkw-Radbremse entwickelt und ist auch heute noch die dominierende Ausführung.<sup>22</sup> Grauguss bietet für die Bremscheibe mit seinem Eigenschaftsprofil einen sehr guten Kompromiss zwischen Funktionalität und Kosten.<sup>23</sup> Neben den für den Anwendungsfall einer Bremscheibe guten mechanischen Eigenschaften, wie beispielsweise Festigkeit, wirken sich die hohe Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität positiv auf die thermische Leistungsfähigkeit einer Bremscheibe aus.<sup>24</sup> Weitere Vorteile resultieren aus dem Reibverhalten im eingesetzten Temperaturbereich sowie der Verarbeitbarkeit.<sup>25</sup> Um den thermischen Anforder-

<sup>22</sup> Engel, H.-G.: Bremscheiben aus Keramik - reif für die Serie?, 2002

<sup>23</sup> Engel, H.-G.: Bremscheiben aus Keramik - reif für die Serie?, 2002

<sup>24</sup> Engel, H.-G.: Bremscheiben aus Keramik - reif für die Serie?, 2002

<sup>25</sup> Mayer, R.: Eine neue Generation von Kraftfahrzeugverbundbremscheiben mit mikroformschlüssiger Pressverbindung durch harte Partikel in der Pressfuge, 2007, S. 162

rungen gerecht zu werden, kommen insbesondere an der Vorderachse heutiger Pkw fast ausschließlich belüftete Bremsscheiben zum Einsatz.<sup>26</sup> Der Aufbau mit zwei Reibringen ist dem Ziel der Massenreduzierung jedoch gegenläufig.

Einen Ansatzpunkt zur Beeinflussung der funktionalen Eigenschaften bietet die Legierungszusammensetzung des Graugusswerkstoffs. Ein Parameter ist der Kohlenstoffgehalt in Verbindung mit der Ausprägung des Kohlenstoffs im Werkstoff. Für den Einsatz in Bremsscheiben hat sich vor allem perlitischer Grauguss mit Lamellengraphit bewährt. Die sehr gute Wärmeleitfähigkeit der Graphitlamellen,<sup>27,28</sup> die mit steigendem Kohlenstoffgehalt zunimmt, hat zur Entwicklung der heute dominierenden hochgekohlten Graugussversionen mit einem Kohlenstoffanteil von bis zu 3,9 % geführt.<sup>29,30</sup> Im Vergleich zu Graugusswerkstoffen mit geringerem Kohlenstoffanteil nimmt der Verschleiß aufgrund der etwas geringeren Härte nur geringfügig zu.<sup>31</sup> Neben einer Verbesserung der wärmeleitenden Eigenschaften wird infolge des hohen Kohlenstoffanteils freier Graphit ausgeschieden. Dies führt mit steigender Temperatur zu einer Erhöhung des Quotienten aus Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul.<sup>32</sup> Zusätzlich zur höheren Wärmeleitfähigkeit kann hierdurch die Rissbeständigkeit deutlich verbessert werden.<sup>33,34</sup> Eine weitere Möglichkeit das Wärmerissverhalten positiv zu beeinflussen ist die Zugabe von Molybdän und Chrom,<sup>35</sup> wodurch jedoch die Gießbarkeit verschlechtert wird.<sup>36</sup> Als weiterer wesentlicher Legierungsbestandteil ist Silizium zu nennen, der die Graphitabscheidung bis zu einem Legierungsanteil von etwa 2,1 % fördert.<sup>37,38</sup>

Nachteilig bei der Verwendung von Grauguss als Bremsscheibenwerkstoff erweisen sich die begrenzte Hochtemperaturfestigkeit sowie die mangelnde Thermoschockbeständig-

---

<sup>26</sup> Remfrey, J.; Gruber, S.; Ocvirk, N.: Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 100

<sup>27</sup> Cueva, G.; Sinatora, A.; Guesser, W. L.; Tschiptschin, A. P.: Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors, 2003, S. 1

<sup>28</sup> Macnaughtan, M. P.; Krosnar, J. G.: Cast Iron – a brake disc material for the future?, 1998, S. 7

<sup>29</sup> Füller, K.-H.: Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen, 1998, S. 12

<sup>30</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremsscheiben, 2003, S. 12

<sup>31</sup> Macnaughtan, M. P.; Krosnar, J. G.: Cast Iron – a brake disc material for the future?, 1998, S. 7

<sup>32</sup> Burckhardt, M.: Fahrwerktechnik: Bremsdynamik und Pkw-Bremsanlagen, 1991, S. 280

<sup>33</sup> Burckhardt, M.: Fahrwerktechnik: Bremsdynamik und Pkw-Bremsanlagen, 1991, S. 280

<sup>34</sup> Macnaughtan, M. P.; Krosnar, J. G.: Cast Iron – a brake disc material for the future?, 1998, S. 7

<sup>35</sup> Remfrey, J.; Gruber, S.; Ocvirk, N.: Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 101

<sup>36</sup> Macnaughtan, M. P.; Krosnar, J. G.: Cast Iron – a brake disc material for the future?, 1998, S. 5

<sup>37</sup> Burckhardt, M.: Fahrwerktechnik: Bremsdynamik und Pkw-Bremsanlagen, 1991, S. 282

<sup>38</sup> Weißbach, W.: Werkstoffkunde, 2007, S. 191

keit.<sup>39</sup> Durch hohe thermische Belastungen kann die Gefügeumwandlungstemperatur von Grauguss lokal überschritten werden, was bei einer anschließenden schnellen Abkühlung dieser Bereiche die Gefahr der Rissbildung erhöht.<sup>40</sup> Die Einhaltung der Temperaturgrenzen in der Auslegung durch eine ausreichende Wärmekapazität ist somit von hoher Bedeutung. Mit Zunahme der maximalen kinetischen Energie der Fahrzeuge in den vergangenen Jahren ist auch die Dimension der Brems Scheiben gestiegen, um den thermischen Anforderungen gerecht zu werden. Hierbei ist in der Fertigung zu berücksichtigen, dass mit zunehmendem Durchmesser eine homogene Gefügeausbildung erschwert wird.<sup>41</sup>

### 2.2.3 Brems Scheiben in Leichtbauweise

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, bieten einteilige Brems Scheiben auf Basis von Grauguss für den Anwendungsfall der Brems Scheibe einen guten Kompromiss zwischen Funktionalität und Kosten. Jedoch weisen sie auch den Nachteil einer durch die Dichte des Werkstoffs bedingten hohen Masse auf. Brems Scheiben in Leichtbauweise haben in der Vergangenheit zunehmend an Bedeutung gewonnen, da sich neben einer Massensparnis zudem Vorteile im Bereich des Bremskomforts (NVH) erzielen lassen.<sup>42</sup> In Abhängigkeit der Bauart und der eingesetzten Werkstoffe werden in dieser Arbeit drei Gruppen von Leichtbau-Brems Scheiben unterschieden, deren charakteristische Eigenschaften nachfolgend vorgestellt werden.

#### 2.2.3.1 Brems Scheiben in Verbundbauweise auf Basis metallischer Werkstoffe

Brems Scheiben in Verbundbauweise auf Basis metallischer Werkstoffe sind bisher durch eine funktionale Trennung zwischen Reibringkörper und Topf charakterisiert, die durch eine Werkstoffsubstitution erreicht wird. Der Topf als drehmomentübertragende Komponente zwischen Reibringkörper und Radnabe wird bei dieser Art Brems Scheiben in Leichtbauweise ausgeführt und besteht zumeist aus einer Aluminiumlegierung. Massenerhöhende Maßnahmen, die sich durch Anforderungen an eine gießgerechte Gestaltung

---

<sup>39</sup> Krenkel, W. (Hrsg.): Keramische Verbundwerkstoffe, 2002, S. 242

<sup>40</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Brems Scheiben, 2003, S. 12

<sup>41</sup> Mayer, R.: Neue Generation von Kraftfahrzeugverbundbrems Scheiben für hohe Drehmomentübertragung, 2006

<sup>42</sup> Mayer, R.: Bremseninduzierte Schwingungen am Kraftfahrzeug, 2007, S. 88 ff.

oder den Anbindungsbereich an den Topf ergeben, sind vermeidbar, was eine lastgerechte Auslegung des Reibringkörpers begünstigt.<sup>43</sup>

Bei einer Trennung zwischen Reibringkörper und Topf beschreibt Mayer<sup>44</sup> neben der erreichbaren Massenersparnis durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im Topfbereich weitere Vorteile infolge einer größeren Dämpfung höherfrequenter Bremsgeräusche und eines geringeren Verschleißes (Hitzerissbeständigkeit).

Die Ausprägung der mittels Verbundbauweise realisierbaren Vorteile hängt vor allem von der Verbindungsart zwischen Reibringkörper und Topf ab. Diese wird über verschiedene Schlussarten realisiert, die analog zu den Schlussarten für drehmomentübertragende Welle-Nabe-Verbindungen abgeleitet werden können. Demnach ist eine Verbindung über Kraft-, Form- oder Stoffschluss realisierbar, wobei auch Kombinationen von Schlussarten möglich sind. Aktuelle Serienbrems scheiben besitzen formschlüssige Verbindungen (vgl. Abbildung 2.3). Stoffschlüssige Verbindungen existieren bedingt durch die Beanspruchungsart und die ungünstigen Umgebungsbedingungen bei einer Brems scheibe bisher laut Mayer<sup>45</sup> nicht. Abbildung 2.3 zeigt exemplarisch Beispiele von Brems scheiben in Verbundbauweise, die sich im Serieneinsatz befinden.

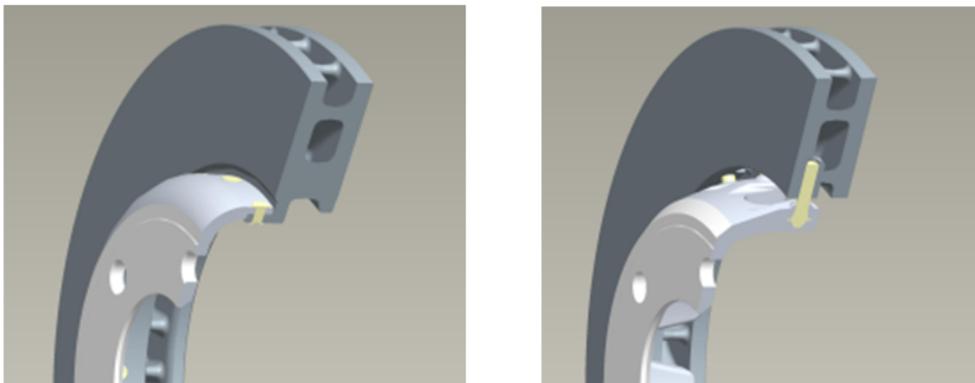


Abbildung 2.3: Serienlösungen von Verbundbrems scheiben mit Nietverbindung (links) und Stiftverbindung (rechts) zwischen Reibringkörper und Topf<sup>46</sup>

Die beiden dargestellten Brems scheibenvarianten weisen unterschiedliche Vorteile in ihrem Eigenschaftsprofil auf. Durch die Verbundbauweise ergibt sich die Möglichkeit die Verbindungselemente mittig im Kühlkanal zu positionieren, wie bei der gestifteten Verbundbrems scheibe in Abhängigkeit der Ausführungsform bereits realisiert (Abbildung 2.3 rechts zeigt eine außermittige Anbindung). Die daraus resultierende

---

<sup>43</sup> Mayer, R.: Neue Generation von Kraftfahrzeugverbundbrems scheiben für hohe Drehmomentübertragung, 2006

<sup>44</sup> Mayer, R.: Neue Generation von Kraftfahrzeugverbundbrems scheiben für hohe Drehmomentübertragung, 2006

<sup>45</sup> Mayer, R.: Bremseninduzierte Schwingungen am Kraftfahrzeug, 2007, S. 90

<sup>46</sup> Schwäbische Hüttenwerke Automotive AG, Firmenunterlagen

symmetrische Ausführung des Reibringkörpers führt nach Schorn<sup>47</sup> zu Vorteilen im Schirmungsverhalten. Als weiterer Vorteil sind die geringeren Spannungen zu nennen, die eine dünnere Ausführung der Reibringe ermöglichen.<sup>48,49</sup> Vergleichbar mit der Grundidee der gestifteten Verbundbremsscheibe ist die von Schorn<sup>50</sup> beschriebene Verbundgussbremsscheibe der Firma Brembo, welche jedoch auf separate Verbindungselemente verzichtet. Der symmetrisch gestaltete Reibringkörper verfügt am Innenradius über angegossene Zapfen, um die der Topf aus Aluminium gegossen wird. Ziel dieser Ausführung ist, wie bei der Verbindung durch Stifte, ein radiales Gleiten des Reibringkörpers unter Last zu ermöglichen.

Neben den genannten form- und kraftschlüssigen Verbindungen beschreibt Mayer<sup>51</sup> erste Forschungserkenntnisse zu Verbundbremsscheiben mit einer kombiniertschlüssigen Verbindung aus Reibkraft- und Formschluss zwischen Topf und Reibringkörper. Der Formschluss erfolgt mittels harter Diamantpartikel mit einer Größe von etwa 20 µm, die in einer Nickelmatrix im Bereich der Pressfuge eingelagert sind. Die zusätzliche formschlüssige Komponente ist erforderlich, um die Übertragung des Bremsmoments, insbesondere unter den thermischen Randbedingungen einer Bremsscheibe, zu gewährleisten.

Die Herstellung des Reibringkörpers von Verbundbremsscheiben zeichnet sich im Vergleich zu einteiligen Bremsscheiben häufig durch eine einfachere Geometrie aus, was sich positiv auf den Gießprozess auswirkt. Der Einsatz von Aluminium und die daraus resultierenden höheren Werkstoffkosten in Verbindung mit dem zusätzlichen Fertigungsaufwand führen dazu, dass Aluminium-Grauguss-Verbundbremsscheiben zum Stand der Recherche vor allem Fahrzeugen der Oberklasse oder sportlichen Modellen vorbehalten sind. Die erreichbare Massensparnis hängt insbesondere von der Dimension der Bremsscheibe, dem Anbindungskonzept sowie der Topfgeometrie ab. Als nachteilig erweist sich aus Leichtbausicht eine Materialdopplung wie sie bei der Nietscheibe zum Einsatz kommt. Aktuelle Aluminium-Grauguss-Verbundbremsscheiben erreichen eine Massensparnis im Bereich von 10 bis 20 %.<sup>52,53</sup>

---

<sup>47</sup> Schorn, M.: Produkt- und Prozessinnovation von Grauguss-Bremsscheiben, 2006, S. 4

<sup>48</sup> Schorn, M.: Produkt- und Prozessinnovation von Grauguss-Bremsscheiben, 2006, S. 4

<sup>49</sup> Hoffmann, I.; Füllgrabe, F.; Winner, H.: Die Zukunft der Bremsscheibe im Umfeld des Leichtbaus, 2010, S. 42

<sup>50</sup> Schorn, M.: Produkt- und Prozessinnovation von Grauguss-Bremsscheiben, 2006, S. 5

<sup>51</sup> Mayer, R.: Neue Generation von Kraftfahrzeugverbundbremsscheiben für hohe Drehmomentübertragung, 2006

<sup>52</sup> Schorn, M.: Produkt- und Prozessinnovation von Grauguss-Bremsscheiben, 2006, S. 5

<sup>53</sup> Schwäbische Hüttenwerke Automotive AG

Neben den beschriebenen Verbundbrems scheiben, die durch den Einsatz von Leichtbauplaststoffen gekennzeichnet sind, ist das Konzept der Sheet-Cast-Disc<sup>54</sup> zu nennen, welches aktuell noch Forschungsgegenstand ist. Die Grundidee basiert nach Lathwesen<sup>55</sup> auf dem Einsatz einer radialelastischen Verbindung zwischen Reibringkörper und Topf (vgl. Abbildung 2.4, rechts), die durch in den Sandkern integrierte Stahleinleger realisiert wird (vgl. Abbildung 2.4, links). Nach dem Gießprozess liegt eine formschlüssige Verbindung zwischen Reibringkörper und Topf vor. Im Hinblick auf das Betriebsverhalten und den Bremskomfort wird durch die radialelastische Anbindung die Ausdehnung des Brems scheiben-Reibrings begünstigt, so dass eine Schirmung weitestgehend minimiert wird.<sup>56</sup> Die erreichbare Massensparnis der Sheet-Cast-Disc für eine Brems scheibe der Dimension Ø320x30 mit Reibringkörper und Topf aus Grauguss wird mit etwa 2 kg ( $\approx 20\%$ ) angegeben.<sup>57</sup> Wesentliche Faktoren für die Massensparnis sind nach Lathwesen eine dem Wärmestrom angepasste Massenverteilung und der Verzicht auf unerwünschte Massenanhäufungen an den Verbindungselementen im Reibringkörper, was zu einer Reduzierung der thermomechanischen Spannungen führt. Als weiteres Leichtbaupotenzial beschreibt Lathwesen die Topfausführung in Aluminium.

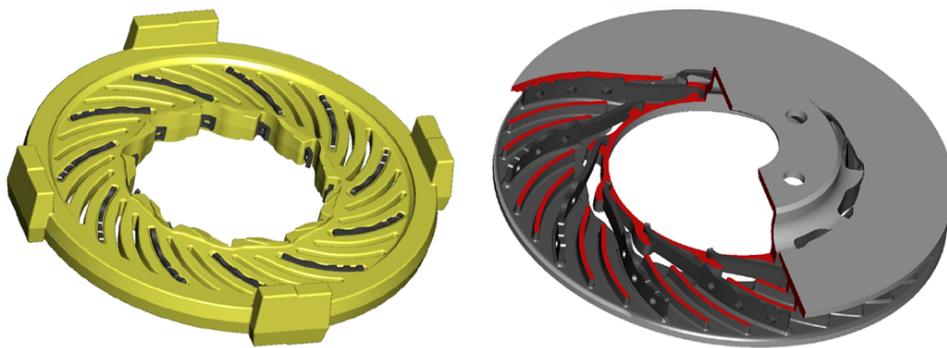


Abbildung 2.4: Sandkern der Sheet Cast Disc mit integrierten Stahleinlegern (links), Schnittansicht der Sheet Cast Disc (rechts)<sup>58</sup>

### 2.2.3.2 Brems scheiben in Verbundbauweise auf Basis keramischer und metallischer Werkstoffe

Verbundbrems scheiben auf Basis keramischer Reibringwerkstoffe gehören mittlerweile zum Stand der Technik und sind, ähnlich wie rein metallische Verbundbrems scheiben,

---

<sup>54</sup> <http://www.innobrake.de/pages/das-grundprinzip/die-sheet-cast-disc/innovation.php>, abgerufen am 13.02.2012

<sup>55</sup> Lathwesen, H.: SHEET CAST Disc – Innovation durch Funktionsintegration, 2012

<sup>56</sup> <http://www.innobrake.de/pages/das-grundprinzip/die-sheet-cast-disc/innovation.php>, abgerufen am 13.02.2012

<sup>57</sup> Kaiser, R.: Sheet Cast – Erprobungsbericht SCD Evo 6.3, 2012, S. 6

<sup>58</sup> Lathwesen, H.: SHEET CAST Disc – Innovation durch Funktionsintegration, 2012

durch eine Trennung zwischen Reibringkörper und Topf gekennzeichnet. Anders als bei den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Bremscheiben wird die Massensparnis vor allem im Bereich des Reibringkörpers erzielt. Als Werkstoffe kommen vor allem kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff (C/C) und kohlenstofffaserverstärkte Keramiken mit Siliziumcarbid-Matrix (C/SiC) zum Einsatz.

C/C-Werkstoffe haben sich trotz der geringen Dichte ( $\approx 2 \text{ g/cm}^3$ ) nicht als Serienanwendung für Pkw durchsetzen können.<sup>59</sup> Die Ursache liegt im für den Serieneinsatz in Straßenfahrzeugen ungünstigen Eigenschaftsprofil des Werkstoffs. Negativ wirken sich vor allem stark schwankende Reibwerte in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen aus sowie ein erhöhter Verschleiß bei niedrigem Lastprofil, wie es im Straßenverkehr üblich ist.<sup>60</sup> Für den Serieneinsatz im öffentlichen Straßenverkehr haben sich kohlenstofffaserverstärkte Siliziumcarbid-Werkstoffe durchgesetzt. Sie kombinieren die Vorteile einer hohen Festigkeit und Bruchzähigkeit von carbonfaserverstärktem Kohlenstoff mit der Härte polykristalliner Siliziumcarbid-Keramiken.<sup>61</sup> Im Gegensatz zu C/C-Bremscheiben zeichnen sie sich durch ein besseres Reibwert- und Verschleißverhalten aus, womit wesentliche Anforderungen an die Alltagstauglichkeit erfüllt werden.<sup>62</sup> Die Dichte ist im Vergleich zu C/C-Bremscheiben nur geringfügig höher ( $2,5\text{--}3 \text{ g/cm}^3$ ) und ermöglicht eine deutliche Massensparnis, die verglichen mit einteiligen Bremscheiben aus Grauguss im Bereich von 50 bis 65 %<sup>63,64</sup> liegt. Der Topf besteht in der Regel aus Edelstahl oder einer Aluminiumlegierung. Die Verbindung mit dem Reibringkörper erfolgt bei den Serienkonzepten axial schwimmend über eine Schraubenverbindung mit Gleithülsen. Zugspannungen, die durch die unterschiedliche thermische Ausdehnung der Werkstoffe entstehen, können damit reduziert werden.<sup>65</sup>

Im Vergleich zu einteiligen Bremscheiben und Verbundbremscheiben auf Basis metallischer Werkstoffe ergeben sich durch die Verwendung des keramischen Verbundwerkstoffes funktions- und fertigungsbedingte Besonderheiten. Die im Vergleich zu Grauguss niedrigere volumenbezogene Wärmekapazität wird nicht vollständig durch die Hochtemperaturfestigkeit des Werkstoffs kompensiert. Daraus resultiert eine konstruktivi-

---

<sup>59</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremscheiben, 2003, S. 13

<sup>60</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremscheiben, 2003, S. 13

<sup>61</sup> SGL Group: Carbon-Keramik-Bremscheiben, 2007, S. 31 f.

<sup>62</sup> SGL Group: Carbon-Keramik-Bremscheiben, 2007, S. 29

<sup>63</sup> Jang, G. H.; Cho, K. H.; Park, S. B.; Lee, W. G.; Hong, U. S.; Jang, H.: Tribological Properties of C/C-SiC Composites for Brake Discs, 2010, S. 61

<sup>64</sup> Remfrey, J.; Gruber, S.; Ocvirk, N.: Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 101

<sup>65</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremscheiben, 2003, S. 15

ve Vergrößerung des Reibringkörperdurchmessers im Bereich von einem Zoll<sup>66</sup> und damit eine Erhöhung der Bauraumanforderungen. Die hohe Betriebstemperatur einer C/SiC-Bremsscheibe, die unter Maximallast bis in einen Bereich von 1350 °C reicht,<sup>67,68</sup> erfordert darüber hinaus zusätzliche Maßnahmen, um Anbauteile wie Bremsattel und Bremsleitungen vor Beschädigungen zu schützen und eine Überhitzung und mögliche Dampfblasenbildung der Bremsflüssigkeit zu verhindern. Neben diesem Nachteil resultieren aus dem Eigenschaftsprofil funktionale Vorteile, die sich vor allem auf den Bremskomfort auswirken. So wird durch die geringe thermische Ausdehnung die Heißrubbelneigung reduziert und die Entstehung von Kaltauswaschungen durch die harte Oberfläche verhindert.<sup>69</sup>

Charakteristische Unterschiede gegenüber Grauguss-Bremsscheiben ergeben sich beim Verschleißverhalten von C/SiC-Bremsscheiben. Im Gegensatz zum abrasiven Verschleißmechanismus von Bremsscheiben mit Grauguss-Reibringkörper erfolgt der Verschleiß bei keramischen Bremsscheiben über Oxidation der Kohlenstofffasern, die bei etwa 400 °C einsetzt und über Laufzeit zu einer abnehmenden Scheibenfestigkeit führt.<sup>70</sup> Die Bremsstaubproblematik in Form von Felgenverschmutzung bzw. Feinstaub tritt somit nicht auf. Im Vergleich zu den in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Bremsscheiben ist der Verschleiß in Summe geringer, was zu einer Lebensdauer von etwa 300.000 km<sup>71</sup> führt (GG-Bremsscheiben: > 60.000 km<sup>72,73</sup>).

Die bei Grauguss-Bremsscheiben und metallischen Verbundbremsscheiben bekannte Rissursache durch Wärmespannungen und Thermoschock ist bei C/SiC-Bremsscheiben aufgrund der erhöhten Thermoschockbeständigkeit von untergeordneter Bedeutung.<sup>74</sup> Bei Bauteilen aus keramischen Werkstoffen induzieren Fehler im Gefüge und an der Oberfläche lokale Spannungsspitzen, die bedingt durch die Kristallstruktur und den

---

<sup>66</sup> Neudeck, D.; Wüllner, A.: Bremsen mit nichtmetallischen Bremsscheiben. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 420

<sup>67</sup> SGL Group: Carbon-Keramik-Bremsscheiben, 2007, S. 34

<sup>68</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremsscheiben, 2003, S. 151

<sup>69</sup> Güther, H.-M.; Wüllner, A.: Optimierung des Kühlkanal Designs von Carbon-Keramik-Bremsen, 2005, S. 25

<sup>70</sup> Neudeck, D.; Wüllner, A.: Bremsen mit nichtmetallischen Bremsscheiben. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 425

<sup>71</sup> Remfrey, J.; Gruber, S.; Ocvirk, N.: Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 101

<sup>72</sup> Füller, K.-H.: Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen, 1998, S. 6

<sup>73</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremsscheiben, 2003, S. 7

<sup>74</sup> Güther, Wüllner, Optimierung des Kühlkanal Designs von Carbon-Keramik-Bremsen (2005), S. 25 f.

Bindungscharakter keramischer Werkstoffe nicht durch plastische Verformung abgebaut werden können.<sup>75</sup> Die daraus resultierende schnelle Rissausbreitung führt nach Speicher<sup>76</sup> zu einem spontanen Versagen des Bauteils. Die Einbringung von Verstärkungsfasern in die Keramik ist eine wirksame Maßnahme, um eine Ausbreitung des Risses zu unterbinden.<sup>77</sup> In der Praxis kommt dieses Verfahren unter anderem bei C/SiC-Bremsscheiben zum Einsatz.<sup>78</sup> Die dort eingebrachten Kohlenstofffasern verleihen dem Bauteil quasiduktile Eigenschaften und wirken durch Prozesse wie Rissablenkung oder Rissüberbrückung einem Rissfortschritt entgegen.<sup>79</sup>

Ein wesentlicher Nachteil von Bremsscheiben auf Basis keramischer Werkstoffe sind die derzeit deutlich höheren Kosten, die aktuell im Bereich von 1.000 € pro Scheibe liegen.<sup>80,81</sup> Neben geringen Stückzahlen liegen die hohen Kosten vor allem im komplexen und aufwändigen Herstellprozess begründet (vgl. Kapitel 2.3), so dass sich der Einsatz aktuell auf Hochleistungsportwagen sowie vereinzelte Fahrzeuge des Luxus-Segments beschränkt.

### 2.2.3.3 Bremsscheiben auf Basis von Aluminiumwerkstoffen

Aluminium hat sich als Leichtbauwerkstoff im Automotivbereich in der Vergangenheit vor allem im Bereich der Karosserie, aber auch im Fahrwerk bewährt. Die Potenzialanalyse von Aluminium als Bremsscheibenwerkstoff hat in den letzten Jahrzehnten einen hohen Stellenwert in der Forschung eingenommen. Aluminium bietet in diesem Zusammenhang Vorteile aufgrund seiner geringen Dichte sowie der hohen Wärmeleitfähigkeit. Ein Forschungsschwerpunkt bilden verstärkte Aluminiumwerkstoffe, sogenannte Matrixverbundwerkstoffe (MMC: Metal Matrix Composite), um die für den Anwendungsfall einer Bremsscheibe mangelnde mechanische und thermische Festigkeit des Grundwerkstoffs Aluminium zu erhöhen. Allgemein sind MMC-Werkstoffe durch eine metallische Grundmatrix (z.B. Aluminium) und eine keramische oder auf Kohlenstoff basierende Verstärkungsphase (z.B. Siliziumcarbid, Aluminiumoxid oder C-Faser) gekennzeichnet, wobei die Verstärkungsphase in Abhängigkeit des zu erreichenden

---

<sup>75</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremsscheiben, 2003, S. 17 f.

<sup>76</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremsscheiben, 2003, S. 17 f.

<sup>77</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremsscheiben, 2003, S. 17 f.

<sup>78</sup> SGL Group: Carbon-Keramik-Bremsscheiben, 2007, S. 32

<sup>79</sup> SGL Group: Carbon-Keramik-Bremsscheiben, 2007, S. 32

<sup>80</sup> Krenkel, W. (Hrsg.): Keramische Verbundwerkstoffe, 2002, S. 242

<sup>81</sup> Schwäbische Hüttenwerke Automotive AG

Eigenschaftsprofils in Form von Partikeln, Fasern oder Schäumen ausgeprägt ist.<sup>82</sup> Über den relativen Volumenanteil der Verstärkungsphase ist eine Beeinflussung der mechanischen und thermischen Werkstoffeigenschaften möglich. Bei der Nutzung von Aluminium als Grundwerkstoff kommen vorzugsweise aushärtbare Legierungen zum Einsatz.<sup>83</sup>

Das Potenzial von Aluminium-MMC als Leichtbauwerkstoff für Brems scheiben ist aus dem Bereich der Schienenfahrzeuge bekannt. So verfügen beispielsweise die Hochgeschwindigkeitszüge ICE-1 und ICE-2 über Brems scheiben aus Aluminium-MMC mit einer Verstärkungsphase aus Siliziumcarbid.<sup>84</sup> Durch die im Vergleich zu Pkw günstigeren Bauraumverhältnisse ist eine einfachere Umgehung der Überhitzungsproblematik für den Anwendungsfall im Schienenverkehr mit entsprechend größeren Brems scheibendimensionen möglich.<sup>85</sup> Im Pkw-Bereich erfolgten erste Serieneinsätze in Form der Hinterradtrommelbremse des VW Lupo 3 l und als Brems scheibe in der Lotus Elise.<sup>86,87</sup> Beide Fahrzeuge haben eine im Vergleich zu anderen typischen Serienfahrzeugen niedrige Gesamtmasse, womit die umzusetzende Energie in der Brems scheibe entsprechend gering ist. Im Lotus ( $m_{Fzg.} \approx 650$  kg) ist eine Massenersparnis von 40 % erreicht worden.<sup>88</sup>

Bei der Verwendung von Al-MMC als Werkstoff für Brems scheiben sind bei der thermischen Auslegung vor allem die im Vergleich zum Grauguss geringere volumetrische Wärmekapazität und der begrenzte Temperatureinsatzbereich zu berücksichtigen. Zwar kann die thermische Festigkeit und damit die maximale Betriebstemperatur durch die verwendete Verstärkungsphase erhöht werden, jedoch ist das Temperaturlimit für Al-MMC mit einem Bereich von 400 bis 535 °C<sup>89</sup> insgesamt sehr niedrig. Bei thermischer Überbeanspruchung erweicht die Aluminiummatrix, so dass trotz des Verschleißschutzes in Form der Verstärkungsphase harte Belagteilchen irreversible Furchen in der

---

<sup>82</sup> Beffort, O.: Metallmatrix-Verbundwerkstoffe: Eigenschaften, Anwendungen und Bearbeitung, 2002, S. 43

<sup>83</sup> Füller, K.-H.: Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen, 1998, S. 13

<sup>84</sup> Cayron, C.: TEM study of interfacial reactions and precipitation mechanisms in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> short fiber or high volume fraction SiC particle reinforced Al-4Cu-1Mg-0.5Ag squeeze-cast composites, 2000, S. 7

<sup>85</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Brems scheiben, 2003, S. 13

<sup>86</sup> Beffort, O.: Metallmatrix-Verbundwerkstoffe: Eigenschaften, Anwendungen und Bearbeitung, 2002, S. 47

<sup>87</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Brems scheiben, 2003, S. 13

<sup>88</sup> Grieve, D. G.; Barton, D. C.; Crolla, D. A.; Buckingham, J. T.: Design of a lightweight automotive brake disc using finite element and Taguchi techniques, 1998, S. 245

<sup>89</sup> Füller, K.-H.: Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen, 1998, S. 13

Oberfläche hinterlassen<sup>90</sup> und dadurch Komfortverhalten und Verschleiß nachhaltig verschlechtern.<sup>91</sup> Im Fokus bisheriger Forschungsaktivitäten haben somit vor allem die Analyse von Einflussfaktoren auf die thermische Leistungsfähigkeit sowie die Reib- bzw. Materialpaarung Belag-Scheibe im Zusammenhang mit dem Verschleißmechanismus gestanden. Charakteristisch für den Reibmechanismus von Brems Scheiben aus Al-MMC ist ein adhäsiver Materialauftrag von Belagkomponenten auf der Reibringoberfläche im ein- bis zweistelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich,<sup>92</sup> der den sogenannten Transferfilm bildet und als Verschleißschutz wirkt.<sup>93</sup> Bei der Verwendung herkömmlicher Bremsbelagmaterialien (NSO, LSO,<sup>94</sup> Sintermetallmaterialien) zeigt Shibata<sup>95</sup>, dass neben einer deutlichen Reibwertabnahme ( $\mu \leq 0,3$ ), insbesondere bei Verwendung von Sinterbelägen, Veränderungen an der Scheibenoberfläche in Form von starkem Verschleiß auftreten. Als einen erfolgreichen Lösungsansatz weist er die Einbindung von Kupferfasern in Verbindung mit weiteren Maßnahmen in der Belagzusammensetzung nach. Dwivedi<sup>96</sup> und Füller<sup>97</sup> zeigen in Vergleichsuntersuchungen zwischen Grauguss- und Al-MMC-Brems Scheiben, dass ein mit Grauguss-Brems Scheiben vergleichbares Reibwertniveau ( $\mu \approx 0,34\text{--}0,4$ ) bei Verwendung speziell abgestimmter Bremsbeläge erreicht werden kann.

Vor dem Hintergrund der begrenzten thermischen Belastbarkeit sind in verschiedenen Forschungsaktivitäten Ansätze zur Erhöhung der thermischen Leistungsfähigkeit identifiziert und deren Potenzial analysiert worden. Die Ergebnisse aus Simulationen und Prüfstandsversuchen zeigen, dass vor allem Bremsungen mit hoher Bremsleistung, wie beispielsweise Stoppbremsungen, ein kritisches Szenario darstellen.<sup>98,99</sup> Die geringere

<sup>90</sup> Straffelini, G.; Pellizzari, M.; Maines, L.; Molinari, A.: Friction and wear behaviour of an Al-based metal-matrix composite against automobile friction materials, 2002, S. 280 ff.

<sup>91</sup> Füller, K.-H.: Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen, 1998, S. 61

<sup>92</sup> Füller, K.-H.: Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen, 1998, S. 61

<sup>93</sup> Shibata, K.; Kawasaki, K.: Untersuchung der tribologischen Eigenschaften von Al-MMC-Brems Scheiben und Reibmaterial, 2000, S. 28

<sup>94</sup> NSO: Nicht-stahlhaltige organische Materialien; LSO: Schwach-stahlhaltige organische Materialien

<sup>95</sup> Shibata, K.; Kawasaki, K.: Untersuchung der tribologischen Eigenschaften von Al-MMC-Brems Scheiben und Reibmaterial, 2000, S. 13 ff.

<sup>96</sup> Dwivedi, R.: Performance of MMC rotors in dynamometer testing, 1994, S. 66

<sup>97</sup> Füller, K.-H.: Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen, 1998, S. 127

<sup>98</sup> Füller, K.-H.: Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen, 1998, S. 102

<sup>99</sup> Grieve, D. G.; Barton, D. C.; Crolla, D. A.; Buckingham, J. T.: Design of a lightweight automotive brake disc using finite element and Taguchi techniques, 1998, S. 247 f.

volumenbezogene Wärmekapazität der Al-MMC-Werkstoffe in Verbindung mit einer im Vergleich zu Grauguss und keramischen Werkstoffen niedrigeren maximalen Einsatztemperatur führt zu einem schnelleren Überhitzen der Scheibe. Vorteile ergeben sich demgegenüber bei Szenarien mit kontinuierlich niedrigem Energieeintrag wie sie beispielsweise bei einer Passabfahrt vorkommen. Als positiv erweist sich die sehr gute Wärmeleitfähigkeit des Aluminiumwerkstoffs, die für eine schnelle Wärmeabfuhr von der Reiboberfläche in Scheibendickenrichtung sorgt. Grieve<sup>100</sup> et al. zeigen in ihren Untersuchungen auf Basis einer FE-Analyse, dass unter der Randbedingung gleicher Fahrzeugmassen die auftretende Maximaltemperatur bei Verwendung einer Bremscheibe aus Al-MMC im Schnitt um etwa 100 °C niedriger als bei einer Grauguss-Bremscheibe ist. Als wesentliche Einflussfaktoren auf die thermische Leistungsfähigkeit werden von Grieve et al. die Dicke des Reibringkörpers, die Wärmeleitfähigkeit sowie die Kühlrate identifiziert.

Bisher ist das Werkstoffkonzept für den Anwendungsfall der Bremscheibe aufgrund der begrenzten thermischen Leistungsfähigkeit nur in sehr leichten Fahrzeugen erfolgreich angewendet worden. Allerdings werden im Fall der Lotus Elise Probleme durch quiet-schende Bremscheiben berichtet.<sup>101</sup> Aktuelle Untersuchungen befassen sich mit Beschichtungen der Reibfläche, mit dem Ziel diese bei hohen Temperaturen vor abrasivem Verschleiß und möglichen irreversiblen Schäden zu schützen. Forschungsergebnisse von Alsaif<sup>102</sup> et al. zeigen, dass ein Schutz des MMC-Grundkörpers mittels einer durch Plasma-elektrolytische Oxidation (PEO) aufgetragenen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht möglich ist.

### 2.2.3.4 Weitere Konzepte für Leichtbau-Bremscheiben

Neben den in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Lösungen für Leichtbau-Bremscheiben existieren weitere Ansätze, die Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten sind. Qu<sup>103</sup> et al. und Blau<sup>104</sup> et al. haben in ihren Untersuchungen das Potenzial von Titanlegierungen als Bremscheibenwerkstoff für Nutzfahrzeuge analysiert. Den Vorteilen einer geringen Dichte sowie guten Festigkeits- und Korrosionseigenschaften stehen

---

<sup>100</sup> Grieve, D. G.; Barton, D. C.; Crolla, D. A.; Buckingham, J. T.: Design of a lightweight automotive brake disc using finite element and Taguchi techniques, 1998, S. 247 ff.

<sup>101</sup> <http://www.elises.co.uk/components/s1/brakes/index.html>, abgerufen am 26.02.2012

<sup>102</sup> Alsaif, M. A.; Dahm, K. L.; Shrestha, S.; Dearnley, P. A.; Barton, D. C.: Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) treated aluminium metal matrix composite rotors for lightweight automotive brakes, 2010, S. 308 ff.

<sup>103</sup> Qu, J.; Blau, P. J.; Jolly, B. C.: Oxygen-diffused titanium as a candidate brake rotor material, 2009, S. 818 ff.

<sup>104</sup> Blau, P. J.; Jolly, B. C.; Qu, J.; Peter, W. H.; Blue, C. A.: Tribological investigation of titanium-based materials for brakes, 2007, S. 1202 ff.

ein ungünstiges Reib- und Verschleißverhalten gegenüber,<sup>105,106</sup> was die Anwendung als Brems scheibenwerkstoff derzeit ausschließt. Qu<sup>107</sup> zeigt in seinen Untersuchungen weiterhin, dass das gezielte Einbringen einer sauerstoffdiffundierten Schutzschicht an der Reibfläche die Beibehaltung eines konstanten, mit anderen Brems scheibenwerkstoffen vergleichbaren Reibwerts ( $\mu \approx 0,3-0,5$ ) bei gleichzeitig reduziertem Verschleiß ermöglicht.

## 2.3 Fertigung von Brems scheiben

Vor dem Hintergrund einer wirtschaftlichen Fertigung von Brems scheiben gehört ein hoher Automatisierungsgrad in Verbindung mit der Verkettung der Produktion zu den Hauptzielen. Verglichen mit der Fertigung einteiliger Brems scheiben aus Grauguss ist der Fertigungsaufwand von Leichtbau-Brems scheiben höher. Die Ursache liegt sowohl in der Mehrteiligkeit als auch in teilweise komplexeren Herstell- und Bearbeitungsprozessen begründet.

Der Fertigungsaufwand mehrteiliger Brems scheiben auf metallischer Basis wird insbesondere durch die Art der Topfherstellung sowie die Verbindungsart zwischen Topf und Reibringkörper beeinflusst. Für die Herstellung des Topfes kommen bisher urformende (Gießen) sowie umformende (Tiefziehen, Schmieden) Fertigungsverfahren zum Einsatz. Erfolgt die Anbindung über Verbindungselemente (Nieten, Schrauben), werden Topf und Reibringkörper zunächst spielbehaftet, gegebenenfalls auch mit geringem Reibkraftschluss zur eindeutigen Positionierung beider Komponenten, gefügt. Das Setzen der Verbindungselemente erfolgt im Anschluss vor der abschließenden mechanischen Bearbeitung. Wird der Brems scheibentopf urformend hergestellt und direkt an den Reibringkörper gegossen, setzt dies das Einbringen der Verbindungselemente im Vorfeld voraus. Abhängig vom Brems scheibenkonzept können die Verbindungselemente bereits vor dem Gießprozess in den Brems scheibenkern integriert werden (vgl. Sheet-Cast-Disc, S. 14) oder aber wie bei der Stiftverbindung (vgl. Abbildung 2.3, rechts, S. 12) nach dem Gießen und einer ersten mechanischen Bearbeitung des Reibringkörpers.

---

<sup>105</sup> Qu, J.; Blau, P. J.; Jolly, B. C.: Oxygen-diffused titanium as a candidate brake rotor material, 2009, S. 818

<sup>106</sup> Blau, P. J.; Jolly, B. C.; Qu, J.; Peter, W. H.; Blue, C. A.: Tribological investigation of titanium-based materials for brakes, 2007, S. 1210

<sup>107</sup> Qu, J.; Blau, P. J.; Jolly, B. C.: Oxygen-diffused titanium as a candidate brake rotor material, 2009, S. 821

Bremsscheiben aus verstärktem Aluminium (Al-MMC) werden durch ihre einteilige Ausführung durch Gießen hergestellt. Höhere Aufwände in der Fertigung entstehen, wie im Abschnitt 2.2.3.3 erläutert, vor allem durch den komplexeren Gießprozess des verstärkten Aluminiums sowie die aufwändigere mechanische Nachbearbeitung. Zur Herstellung gegossener Bauteile aus Al-MMC werden in das flüssige Metall Partikel oder Whisker eingerührt, wobei die mangelnde Benetzbarkeit zwischen Metallschmelze und Keramik zu überwinden und Reaktionen zwischen beiden Phasen zu unterbinden sind.<sup>108,109</sup> Der Volumenanteil der keramischen Verstärkungsphase ist aus Viskositätsgründen auf 20–30 % begrenzt.<sup>110</sup> Die mechanische Bearbeitung von MMC erfordert aufgrund der Verstärkungsphase den Einsatz von Diamantwerkzeugen und entsprechend abgestimmter Bearbeitungsparameter, um Werkzeugstandzeit und Ergebnisqualität zu optimieren.<sup>111,112</sup> Für die Bearbeitung eignen sich sowohl PKD-Werkzeuge als auch CVD-Diamantbeschichtungen auf entsprechenden Hartmetallsubstraten.<sup>113</sup>

Der Fertigungsprozess von Carbon-Keramik-Bremsscheiben ist durch einen hohen Komplexitätsgrad gekennzeichnet. Ausgehend von der Herstellung der Carbonfaser-Mischung bis zur fertigen Bremsscheibe wird in einem Zeitraum von bis zu drei Wochen<sup>114</sup> eine Vielzahl von Arbeitsschritten durchlaufen (vgl. Abbildung 2.5). Im Anschluss an die Reibringkörperfertigung erfolgt die Verbindung mit dem Topf, der in der Regel als Umformteil aus Aluminium oder Edelstahl ausgeführt ist. Aus fertigungstechnischen und ökonomischen Gründen ist eine Herstellung der Bremsscheibe aus einem Teil bisher nicht realisiert worden.<sup>115</sup> Die Anbindung des Topfes an den Reibringkörper wird zumeist als Schraubverbindung ausgeführt. Über Gleitelemente wird das unterschiedliche Wärmeausdehnungsverhalten der Werkstoffe kompensiert.<sup>116,117</sup>

---

<sup>108</sup> Vitzthum, E.; Lenke, I.: Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe für tribologische Anwendung, 2005, S. 307

<sup>109</sup> Beffort, O.: Metallmatrix-Verbundwerkstoffe: Eigenschaften, Anwendungen und Bearbeitung, 2002, S. 45

<sup>110</sup> Vitzthum, E.; Lenke, I.: Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe für tribologische Anwendung, 2005, S. 307

<sup>111</sup> Beffort, O.: Metallmatrix-Verbundwerkstoffe: Eigenschaften, Anwendungen und Bearbeitung, 2002, S. 48 ff.

<sup>112</sup> Kevorkijian, V. M.; Dragojevič, V.; Smolar, T.; Lenarčič, D.: A brake disc in Al-based composite, 2002, S. 421 ff.

<sup>113</sup> Beffort, O.: Metallmatrix-Verbundwerkstoffe: Eigenschaften, Anwendungen und Bearbeitung, 2002, S. 49

<sup>114</sup> SGL Group: Carbon-Keramik-Bremsscheiben, 2007, S. 51

<sup>115</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremsscheiben, 2003, S. 15

<sup>116</sup> Neudeck, D.; Wüllner, A.: Bremsen mit nichtmetallischen Bremsscheiben. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 423

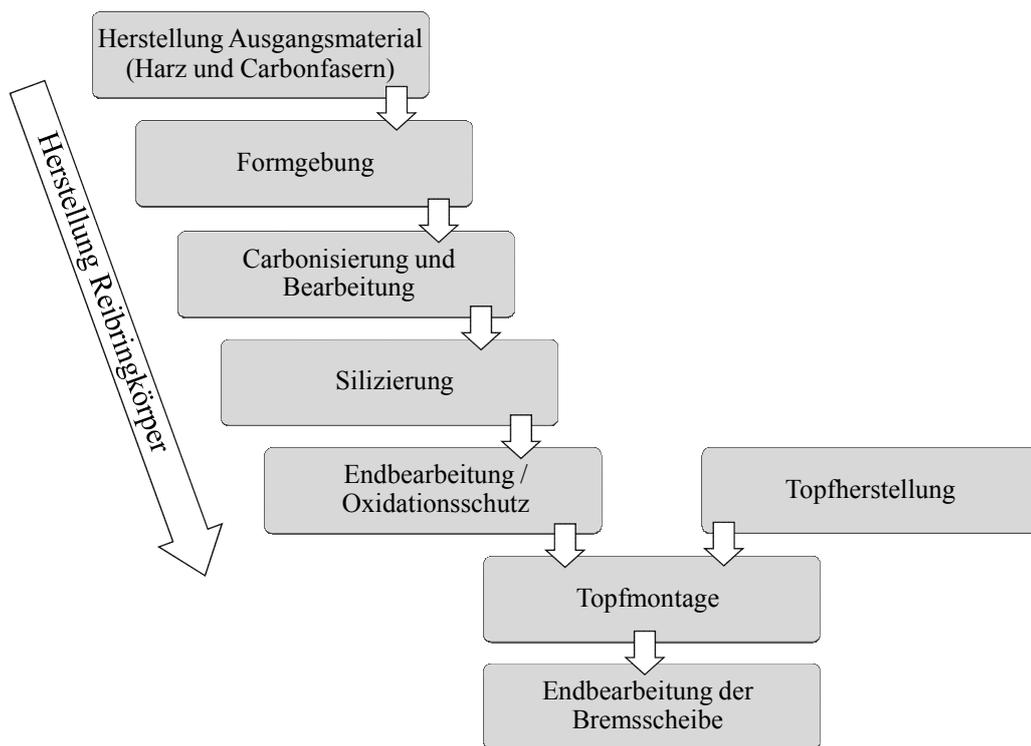


Abbildung 2.5: Prozessschritte bei der Herstellung einer C/SiC-Bremsscheibe<sup>118</sup>

Der Vergleich der Fertigungsverfahren für die verschiedenen Bauarten von aktuellen, in der Serie eingesetzten Bremsscheiben zeigt, dass mit zunehmender erzielbarer Massensparnis auch der Fertigungsaufwand und damit die Kosten steigen.

## 2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Aufgrund eines ausgewogenen Eigenschaftsprofils und geringer Kosten ist die einteilige Bremsscheibe aus Grauguss immer noch die dominierende Anwendung für Pkw-Radbremzen. Steigende Anforderungen an Leichtbau und Bremseigenschaften haben in der Vergangenheit die Entwicklung von massereduzierten Bremsscheiben gefördert. Bezogen auf aktuelle Leichtbau-Bremsscheiben dominiert nach aktuellem Stand der Technik und Forschung der Stoffleichtbau in Verbindung mit einer Verbundbauweise. Neben Bremsscheiben auf Basis keramischer Werkstoffe befinden sich aufgrund geringerer Bauteilkosten vor allem Verbundbremsscheiben mit metallischen Werkstoffen im Serieneinsatz, wobei der Topf in Aluminium ausgeführt ist und formschlüssig an den

<sup>117</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremsscheiben, 2003, S. 15

<sup>118</sup> Darstellung aufbauend auf: SGL Group: Carbon-Keramik-Bremsscheiben, 2007

Reibringkörper angebunden ist. In den Forschungsarbeiten von Mayer<sup>119</sup> wird erstmals eine Bremsscheibe in Verbundbauweise entwickelt und erfolgreich untersucht, die eine reibkraftschlüssige Verbindungskomponente enthält. Das Forschungskonzept der Sheet-Cast-Disc zeigt die Möglichkeit auf, eine Leichtbau-Bremsscheibe in Verbundbauweise ohne den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen zu realisieren. Einteilige Bremsscheiben auf Basis verstärkter Aluminiumwerkstoffe (Al-MMC) sind Gegenstand verschiedener Forschungsaktivitäten in Bezug auf funktionsrelevante und fertigungstechnische Themen. Im Vordergrund stehen insbesondere die thermische Leistungsfähigkeit sowie die Reib- und Verschleißigenschaften, die im Vergleich zu bisherigen Serien-Bremsscheiben nachteilig sind.

Ein Vergleich der Werkstoffkonzepte zeigt, dass die Funktionserfüllung einer Bremsscheibe durch unterschiedliche Ausprägungen der Werkstoffeigenschaften erreicht wird. In Anlehnung an Grieve<sup>120</sup> et al. werden in diesem Zusammenhang drei Werkstoffstrategien für Bremsscheiben dargestellt (vgl. Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Werkstoffstrategien für Bremsscheiben<sup>121</sup>

Werkstofftyp	Werkstoff mit hoher thermischer Masse	Werkstoff mit hoher Wärmeleitfähigkeit	Hochtemperaturwerkstoffe
<b>Werkstoff-eigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ hohe spez. Wärmekapazität</li> <li>▪ hohe Dichte</li> <li>▪ hoher Schmelzpunkt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ hohe Wärmeleitfähigkeit</li> <li>▪ geringe Dichte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ hoher Schmelzpunkt</li> <li>▪ hohe Emissivität</li> <li>▪ geringe Wärmeleitfähigkeit</li> <li>▪ geringe thermische Ausdehnung</li> </ul>
<b>Beispielwerkstoff</b>	Grauguss	Al-MMC	CMC

Neben Auswirkungen auf die Bauteilmasse beeinflusst die Ausführung der Anbindung das Betriebsverhalten der Bremsscheibe, insbesondere auch hinsichtlich des Bremskomforts. Tabelle 2.4 zeigt eine aus dem vorgestellten Stand der Technik und Forschung abgeleitete allgemeine Übersicht der diskutierten Leichtbaukonzepte bezogen auf den Aufbau der Bremsscheiben sowie das Verhältnis von Aufwand zur Größenordnung der erreichbaren Massensparnis. Unter dem Oberbegriff Aufwand werden in dieser Arbeit kostenbeeinflussende Eigenschaften in Form der eingesetzten Fertigungsverfahren (Anzahl von Prozessschritten) und Werkstoffe verstanden. Als Referenz dient die einteilige Grauguss-Bremsscheibe.

<sup>119</sup> Mayer, R.: Neue Generation von Kraftfahrzeugverbundbremsscheiben für hohe Drehmomentübertragung, 2006

<sup>120</sup> Grieve, D.; Barton, D. C.; Crolla, D. A.; Buckingham, J. B.; Chapman, J.: Investigation of Light Weight Materials for Brake Rotor Applications, 1995, S. 64

<sup>121</sup> In Anlehnung an: Grieve, D.; Barton, D. C.; Crolla, D. A.; Buckingham, J. B.; Chapman, J.: Investigation of Light Weight Materials for Brake Rotor Applications, 1995, S. 64

Tabelle 2.4: Übersicht verschiedener Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben

	Grauguss	Metallischer Verbund	CMC	MMC
<b>Bremsscheibenaufbau</b>				
Bauart	einteilig	mehrteilig	mehrteilig	einteilig
Verbindung	---	Formschluss / kombinierter Schluss	kombinierter Schluss	---
Verbindungselemente	---	z.B. Stifte, Nieten, Schrauben	Schrauben + Gleitelemente	---
Eingesetzte Werkstoffe	Grauguss mit Lamellengraphit (GJL)	GJL ( <b>Reibringkörper</b> ) Aluminium / Grauguss ( <b>Topf</b> )	C/SiC ( <b>Reibringkörper</b> ) Edelstahl / Aluminium ( <b>Topf</b> )	verstärkte Aluminiummatrix (Verstärkungsphase: SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
<b>Aufwand / Massenersparnis</b>				
Max. Massenersparnis	---	ca. 20 %	ca. 65 %	ca. 40 %
Aufwand	gering	mittel - hoch	sehr hoch	hoch

Die erreichbare Massenersparnis und der Aufwand werden neben den verwendeten Werkstoffen durch die Art der Verbindung bei mehrteiligen Bremsscheiben sowie den Fertigungsprozess der Bremsscheibe bestimmt. Der daraus resultierende Zielkonflikt ist in Abbildung 2.6 qualitativ dargestellt.

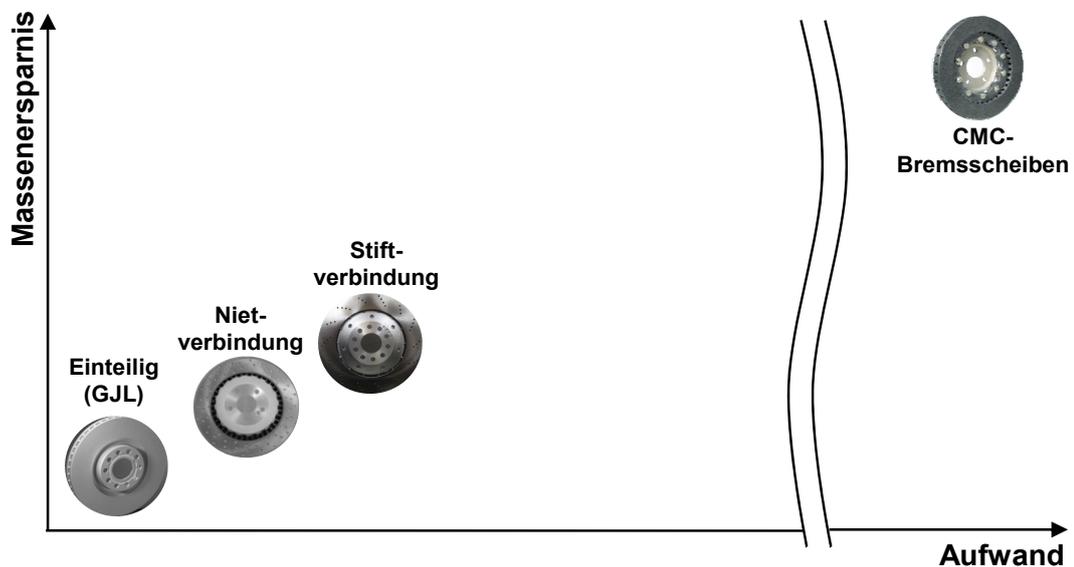


Abbildung 2.6: Qualitative Darstellung des Zielkonflikts zwischen erreichbarer Massenersparnis und Aufwand für bestehende Serien-Bremsscheiben<sup>122</sup>

<sup>122</sup> In Anlehnung an: Hoffmann, I.; Füllgrabe, F.; Winner, H.: Die Zukunft der Bremsscheibe im Umfeld des Leichtbaus, 2010, S. 43

## 3 Zielsetzung und Methodik der Arbeit

Aus den Ergebnissen zum Stand der Technik und Forschung auf dem Gebiet von Leichtbau-Bremsscheiben sowie der in Kapitel 1 dargestellten Ausgangslage erfolgt die Ableitung und Konkretisierung der Zielsetzung dieser Arbeit. Darauf aufbauend wird die Methodik der Arbeit erläutert.

### 3.1 Forschungsbedarf und Zielformulierung

Die Ergebnisse zum Stand der Technik und Forschung zeigen, dass verschiedene Werkstoffstrategien und Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben existieren, die einem Zielkonflikt zwischen der erreichbaren Massenersparnis und dem erforderlichen Aufwand unterliegen (vgl. Abbildung 2.6). Der Aufwand, unter dem in dieser Arbeit kostenbeeinflussende Eigenschaften in Form der eingesetzten Fertigungsverfahren und Werkstoffe verstanden werden, steigt mit zunehmender Massenersparnis. Daraus folgt die bisherige Einschränkung des Anwendungsfelds von Leichtbau-Bremsscheiben auf hochpreisige Fahrzeugsegmente mit geringen Stückzahlen. Vor dem Hintergrund der in Kapitel 1.1 geschilderten Anforderungen durch die Gesetzgebung, ist eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen über alle Fahrzeugklassen hinweg erforderlich.<sup>123</sup> Aufgrund der im Vergleich deutlich höheren Stückzahlen sind in diesem Zusammenhang vor allem Fahrzeugsegmente wie das Mittelklassesegment relevant. Der darüber hinaus herrschende Kostendruck in der Entwicklung<sup>124</sup> erfordert demnach für eine Umsetzung in diesen Fahrzeugsegmenten die Realisierung von kostengünstigen Lösungen für Leichtbau-Bremsscheiben. Die Erarbeitung und Bewertung des Potenzials von Konzepten, die für den Serieneinsatz geeignet sind und im Vergleich zu bisherigen Konzepten durch einen geringeren Aufwand gekennzeichnet sind, bilden ein Ziel dieser Arbeit.

Nach dem erläuterten Stand der Technik und Forschung haben sich bisher keine Konzepte in Serienanwendungen durchgesetzt, die hinsichtlich einer Massenersparnis den Raum zwischen metallischen Verbundbremsscheiben und den sehr teuren CMC-Bremsscheiben schließen. Die vorgestellten MMC-Bremsscheiben sind dort einzuordnen, eignen sich aufgrund der limitierten thermischen Belastbarkeit jedoch nur für Fahrzeuge mit geringer maximaler kinetischer Energie. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit

---

<sup>123</sup> Krinke, S.; Koffler, C.: *Automobiler Leichtbau unter Einbezug des gesamten Lebenszyklus*, S. 439, 2010

<sup>124</sup> Heißing, B.; Ersoy, M. (Hrsg.): *Fahrwerkhandbuch*, S. 449, 2007

ist daher die Klärung der Fragestellung, ob dieser Bereich, beispielsweise durch eine funktionsgerechte Auslegung, erschlossen werden kann.

Die abgeleiteten Ziele adressieren unterschiedliche Bereiche im Lösungsraum von Massenersparnis und Aufwand (vgl. Abbildung 3.1). Zur Erreichung der beschriebenen Ziele ist bisher kein systematischer Entwicklungsansatz für Leichtbau-Bremsscheiben bekannt, der funktionale und fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt. Daraus wird als weiteres Ziel im Rahmen dieser Arbeit die Erarbeitung einer Systematik von Brems-scheiben abgeleitet, die eine Konzeptauswahl in Abhängigkeit der Anforderungen, wie beispielsweise Leichtbau oder der eingesetzten Fertigungsverfahren, ermöglicht. Am Beispiel verschiedener ausgearbeiteter Leichtbaukonzepte, die den genannten Lösungsraum adressieren, ist die Gültigkeit der Methode zu überprüfen. Die realisierten Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben sind prototypisch umzusetzen und abschließend in Simulation und Versuch bezüglich ihrer Validität zu analysieren.

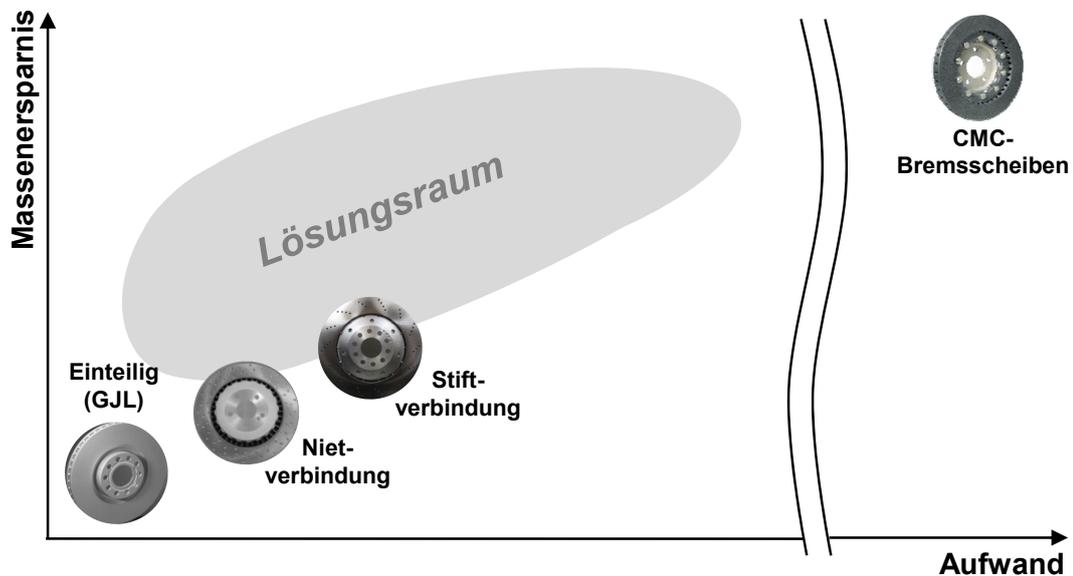


Abbildung 3.1: Abgeleiteter Lösungsraum im Zielkonflikt zwischen erreichbarer Massenersparnis und Aufwand

## 3.2 Methodik

Über die Beschreibung des Bremsvorgangs mit der Methode des erweiterten Prozessmodells werden in einem ersten Schritt die Haupt- und Teilfunktionen einer Bremsscheibe sowie die zur Darstellung der Funktionen relevanten Parameter ermittelt. Aus den Ergebnissen der Funktionsanalyse und unter Berücksichtigung weiterer identifizierter lösungsrelevanter Merkmale wird eine Systematik von Bremsscheiben entwickelt. Neben einer strukturierten Darstellung des Lösungsraums von Bremsscheiben wird die Systematik genutzt, um neuartige Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben abzuleiten,

die Potenzial für eine kostengünstige Realisierung bieten. Die Konzeptauswahl wird durch ein in dieser Arbeit entwickeltes thermisch-analytisches Modell unterstützt. Das Modell ermöglicht für verschiedene Bremszenarien die schnelle Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit einer Brems Scheibe bei Variation werkstofftechnischer und geometrischer Parameter, was unterstützend in den Phasen der Konzeptfindung und Konzeptbewertung eingesetzt wird.

Am Beispiel einer relevanten Brems Scheibengeometrie des Audi A4 B8 (Typ 8K) werden die ausgewählten Konzepte prototypisch umgesetzt. Die Analyse der Eigenschaften sowie die Validierung der Prototypen erfolgen in Simulation und Versuchen an Schwungmassenprüfständen. Auswahl und Konfiguration der Validierungsversuche basieren auf den zuvor identifizierten individuellen Risiken der Konzepte sowie weiteren Versuchen zur Prüfung der Leistungsfähigkeit und des Komfortverhaltens der Brems Scheiben. In die Ergebnisdiskussion werden als Vergleichsbasis die Ergebnisse der Serienbrems Scheibe gleicher Dimension einbezogen. Die umgesetzten Leichtbaukonzepte werden abschließend auf Basis der Versuchsergebnisse auf ihre Validität geprüft und hinsichtlich der Zielsetzung dieser Arbeit diskutiert. Abbildung 3.2 zeigt schematisch die in dieser Arbeit angewendete Methodik.

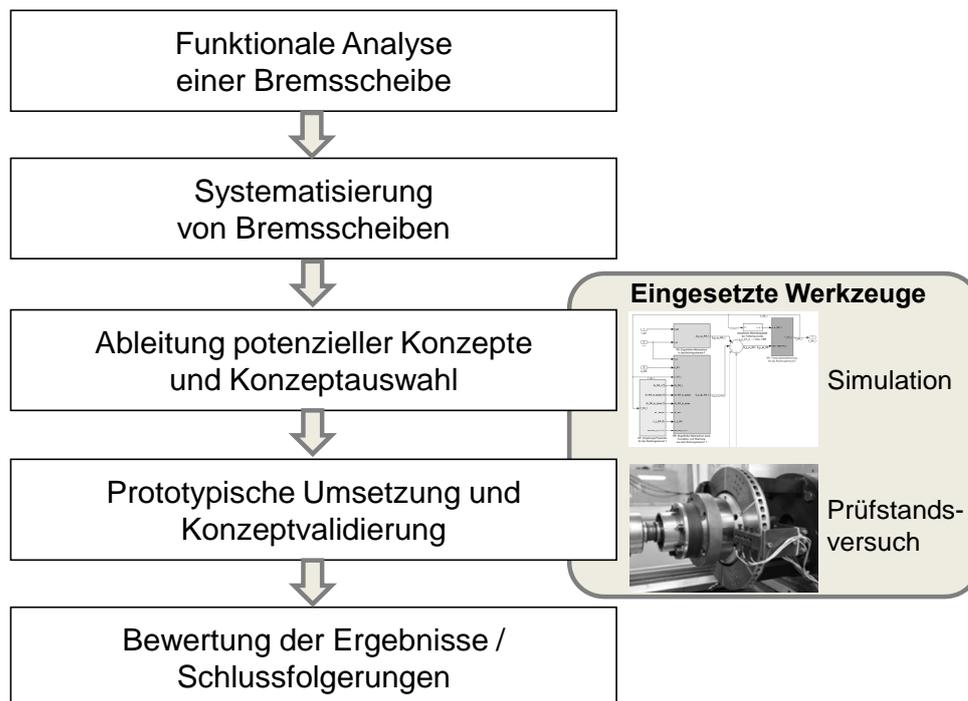


Abbildung 3.2: Methodik des Vorgehens

## 4 Funktionale Grundlagen von Scheibenbremsen

Aufbauend auf der Beschreibung der funktionalen Wirkungskette einer Fahrzeugbremsanlage erfolgt die Analyse der Bremsscheibe im Umfeld der Radbremse in einer Prozessmodellardarstellung. Die im Modell dargestellten Zusammenhänge zwischen den Wirkgrößen und die aus dem Modell abgeleiteten funktionalen Anforderungen bilden die Grundlage für die Zerlegung einer Bremsscheibe in Teilfunktionen. Die Beschreibung der Teilfunktionen erfolgt über eine aus der Produktentwicklung angepasste Eigenschafts- und Merkmalsanalyse. Als Ergebnis sind die Teilfunktionen einer Bremsscheibe identifiziert und die funktionsbeeinflussenden Parameter sowie deren Beziehungen zueinander unter Einbeziehung angrenzender Systemkomponenten beschrieben. Die nachfolgenden Darstellungen beziehen sich auf hydraulisch betätigte Scheibenbremsen, sofern nicht anders beschrieben.

### 4.1 Wirkungskette in einer Pkw-Bremsanlage

Scheibenbremsen in der Bauform der Teilbelag-Scheibenbremsen sind im Pkw-Bereich mittlerweile die dominierende Bremsausführung. Im Vergleich zu Trommelbremsen zeichnen sie sich durch eine bessere Kühlung aus, womit die Gefahr eines Nachlassens der Bremswirkung in Folge von Überhitzung, das sogenannte Bremsenfading, deutlich reduziert wird.<sup>125</sup> Lediglich an der Hinterachse von leichteren Pkw und im Nutzfahrzeugbereich findet die Trommelbremse aufgrund geringer Kosten und hoher Lebensdauer noch häufig Anwendung.<sup>126</sup>

Teilbelag-Scheibenbremsen bestehen aus drei wesentlichen Hauptkomponenten: der Bremsscheibe, dem Bremssattel sowie einem Bremsbelagpaar. Abbildung 4.1 zeigt exemplarisch den Aufbau eines Faustsattels für eine Scheibenbremse, der die Grundlage für die folgende Erläuterung des Wirkprinzips bildet.

---

<sup>125</sup> Eichhorn, U.; Fuhrmann, K. H.: Fahrzeugtechnische Anforderungen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 19

<sup>126</sup> Heißing, B.; Ersoy, M. (Hrsg.): Fahrwerkhandbuch, S. 169 f., 2007

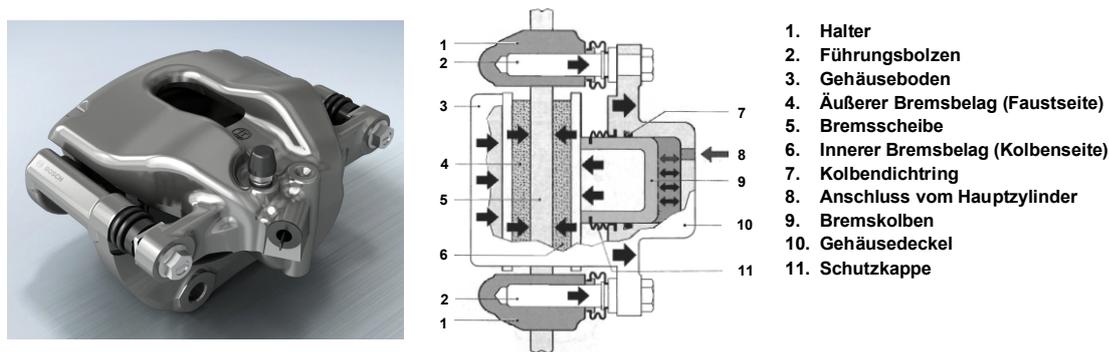


Abbildung 4.1: Aufbau und Komponenten eines Faustsattels<sup>127,128</sup>

Die Aufgabe der Bremse kann abhängig vom Betriebszustand in eine statische beziehungsweise in eine dynamische Funktion unterteilt werden. Die statische Funktionalität der Bremse bei stehendem Fahrzeug stellt eine reine Haltefunktion dar. Als Beispiele sind die Sicherung des Fahrzeugs gegen Wegrollen an einer Steigung zu nennen bzw. das bei Fahrzeugen mit Automatikgetriebe und automatisierten Schaltgetrieben dem Kriechmoment entgegenwirkende Bremsmoment, um das Fahrzeug im Stillstand zu halten.

Im Gegensatz dazu kann die dynamische Funktion der Bremse bei fahrendem Fahrzeug allgemein als die vom Fahrer gewünschte Reduzierung der Fahrzeugenergie beschrieben werden. Diese setzt sich anteilig aus potenzieller und kinetischer Energie des Fahrzeugs zusammen, wobei bei Betätigung des Bremspedals nicht zwingend eine Änderung beider Größen vorliegt. So bleibt bei einer Passabfahrt die kinetische Energie trotz Betätigung der Bremse gleich, bei in Summe abnehmender Fahrzeugenergie durch Senkung der potenziellen Energie.

Die Reduzierung der Fahrzeugenergie wird vom Fahrer durch Betätigung des Bremspedals eingeleitet. Die Fußkraft  $F_{Fu\beta}$  des Fahrers wird über das Fußhebelwerk übersetzt, so dass auf die Kolbenstange des Bremskraftverstärkers die Betätigungskraft  $F_{Bet}$  wirkt. Bei Pkw-Bremsanlagen kommen in der Regel Unterdruck-Bremskraftverstärker zum Einsatz. Abhängig von der konstruktiven Gestaltung des Bremskraftverstärkers wird die Kraft  $F_{Bet}$  um einen definierten Faktor verstärkt. Die resultierende Kraft  $F_{Kolben,HBZ}$  wirkt über die Druckstange auf den Hauptbremszylinder. In diesem erfolgt die Umwandlung von mechanischer in hydraulische Energie. Der über die Kolbenkraft im Hauptbremszylinder aufgebaute Druck leitet die Bremsflüssigkeit in die Radbremskreise. Für die vorliegende vereinfachte Betrachtung werden bremsdruckbeeinflussende Komponenten im Hydraulikkreislauf nicht betrachtet.

<sup>127</sup> Abbildung links: [www.bosch-presse.de](http://www.bosch-presse.de), Pressebild-Nr. 1-CB-17869 zu Presse-Information PI7490

<sup>128</sup> Abbildung rechts: Degenstein, T.: Kraftmessung in Scheibenbremsen, 2007, S. 6

In der Radbremse wirkt der hydraulische Druck auf die Fläche des Bremskolbens, woraus die Kolbenkraft  $F_{Kolben}$  resultiert und den Belag auf der Kolbenseite gegen die Bremsscheibe drückt. Das Funktionsprinzip einer Schwimmsattelbremse bedingt eine Reaktionskraft, die in der Folge zu einer Verschiebung des Gehäuses führt. Der Belag auf der Radseite wird somit unter Vernachlässigung von Reibungskräften mit gleicher Kraft an die Bremsscheibe gedrückt. Die zwischen Bremsbelägen und Bremsscheibe wirkenden Axialkräfte werden als Spannkraft  $F_{Sp}$  bezeichnet.

Im Idealfall, unter Vernachlässigung von Reibung im System, ist die Kolbenkraft gleich der resultierenden Spannkraft zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe. In Folge der Relativbewegungen zwischen den Bauteilen entstehen Reibungskräfte, die dazu führen, dass die resultierende Spannkraft um den Betrag der Reibungskräfte kleiner ist als die Kolbenkraft (vgl. Degenstein<sup>129</sup>), was durch den Wirkungsgrad  $\eta$  berücksichtigt wird. Demnach gilt:

$$F_{Sp} = \underbrace{p_{hydr.} \cdot A_{Kolben}}_{F_{Kolben}} \cdot \eta \quad (4.1)$$

Aus den Spannkraften und dem zwischen Bremsbelägen und -scheibe wirkenden Reibkoeffizienten  $\mu$  resultiert entsprechend des Coulomb'schen Reibungsgesetzes die Umfangskraft  $F_{Umfang}$ :

$$F_{Umfang} = 2 \cdot F_{Sp} \cdot \mu \quad (4.2)$$

Aus dieser ergibt sich mit dem Verhältnis zwischen effektivem Reibradius  $r_{eff}$  und dynamischem Reifenhalbmesser  $r_{dyn}$  die zwischen Reifen und Fahrbahn wirkende Bremskraft  $F_{Brems}$  zu

$$F_{Brems} = F_{Umfang} \cdot \frac{r_{eff}}{r_{dyn}} \quad (4.3)$$

und das resultierende Bremsmoment  $M_{Brems}$ :

$$M_{Brems} = 2 \cdot F_{Sp} \cdot \mu \cdot r_{eff} \quad (4.4)$$

Da der Bremssattel eine endliche Steifigkeit besitzt, kommt es im Betrieb als Folge der Kolbenkraft zu einer Sattelaufweitung, die neben einer vorzuhaltenden Volumenaufnahme zu einer ungleichmäßigen Flächenpressungsverteilung in radialer Richtung führt.<sup>130</sup> Somit verschiebt sich auch der Kraftangriffspunkt in radialer Richtung, was über den effektiven Reibradius das vom Reifen abzustütze Bremsmoment beeinflusst. In Abbildung 4.2 ist der Kraftfluss in einem hydraulischen Bremssystem vom Fahrer bis zur Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn dargestellt.

<sup>129</sup> Degenstein, T.: Kraftmessung in Scheibenbremsen, 2007, S. 19 f.

<sup>130</sup> Degenstein, T.: Kraftmessung in Scheibenbremsen, 2007, S. 20 f.

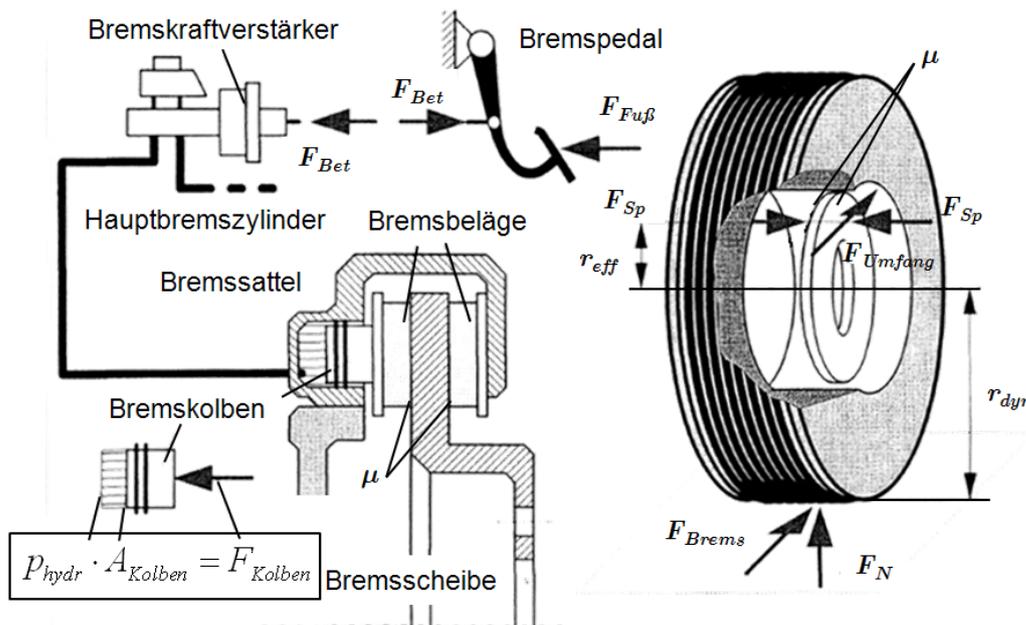


Abbildung 4.2: Wirkungskette innerhalb eines hydraulischen Pkw-Bremssystems mit Schwimmsattelbremse<sup>131</sup>

## 4.2 Funktionsbeschreibung von Scheibenbremsen

### 4.2.1 Prozessmodell Darstellung der Scheibenbremse

Für die Beschreibung der Funktionen einer Bremsscheibe und die Anforderungsermittlung wird das in Abbildung 4.2 vereinfacht dargestellte Gesamtsystem einer Pkw-Bremsanlage zunächst auf das Teilsystem Radbremse reduziert. Die Systemgrenze umschließt somit den Bremssattel mit Bremsbelägen sowie die Bremsscheibe. Die Berücksichtigung von Bremssattel und -belägen bietet die Möglichkeit Wechselwirkungen zwischen den Komponenten einzubeziehen. Als Grundlage zur Ermittlung und Darstellung der physikalischen Wirkzusammenhänge sowie der Wechselwirkungen zwischen den Komponenten wird das aus der methodischen Produktentwicklung bekannte erweiterte Prozessmodell<sup>132</sup> eingesetzt. Im Projektdefinitionsprozess ist es unter anderem als Methode zur Erarbeitung von Bauteil- oder Systemanforderungen geeignet.<sup>133</sup>

<sup>131</sup> Darstellung in Anlehnung an: Degenstein, T. (nach Wallentowitz, 1997): Kraftmessung in Scheibenbremsen, S. 5, 2007

<sup>132</sup> Vgl. Birkhofer, H.: Skriptum zur Vorlesung Produktentwicklung I, 2005, Kap. 2, S. 22

<sup>133</sup> Birkhofer, H.: Skriptum zur Vorlesung Produktentwicklung I, 2005, Kap. 2, S. 22 ff.

Im vorliegenden Fall wird das System durch den Bremsprozess sowie die Radbremskomponenten abgebildet, wobei die Bremsscheibe als zu analysierendes Bauteil im Vordergrund steht. Auf Prozessebene wird der Anfangszustand durch den Energiezustand der Bremsscheibe beschrieben. Dieser setzt sich entsprechend der Gleichungen (4.5) bis (4.8) aus kinetischer Energie, potenzieller Energie und rotatorischer Energie der Bremsscheibe zusammen.

$$E_{gesamt,BS} = E_{kin} + E_{pot} + E_{rot} \quad (4.5)$$

$$E_{kin,BS} = \frac{1}{2} \cdot m_{BS} \cdot v_{Fzg}^2 \quad (4.6)$$

$$E_{pot,BS} = m_{BS} \cdot g \cdot h \quad (4.7)$$

$$E_{rot,BS} = \frac{1}{2} \cdot \Theta_{BS} \cdot \omega_{BS}^2 \quad (4.8)$$

Die auf den Anfangszustand wirkende Systemeingangsgröße für die Radbremse ist der hydraulische Druck, der vom Fahrer durch Betätigung des Bremspedals aufgebracht wird. Über die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Übertragungswege werden an der Bremsscheibe Spannkraften  $F_{Sp}$  erzeugt, die unter Berücksichtigung des Reibkoeffizienten zwischen Bremsscheibe und Bremsbelägen in eine Umfangskraft  $F_{Umfang}$  umgewandelt werden. Aus dieser ergibt sich in Verbindung mit dem effektiven Reibradius das resultierende Bremsmoment  $M_{Brems}$ . Durch die Einwirkung eines Bremsmoments als resultierende Wirkgröße wird, unter Vernachlässigung von Fahrwiderstandskräften und Reibungsverlusten im Triebstrang des Fahrzeugs, die Energie der Bremsscheibe vollständig in thermische Energie  $E_{therm.}$  gewandelt. Über diese Energiebetrachtung werden die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Bremsszenarien abgebildet. Der Endzustand wird somit durch folgende Zusammenhänge beschrieben.

$$E_{BS,EZ} + E_{therm.} = E_{BS,AZ} \quad (4.9)$$

Die für den Fahrer relevante und wahrnehmbare Größe stellt die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg.}$  als Führungsgröße am Ende des Prozesses dar. Abbildung 4.3 zeigt das vereinfachte Prozessmodell ohne Berücksichtigung von Einflüssen durch Stör- oder Neben-  
größen.

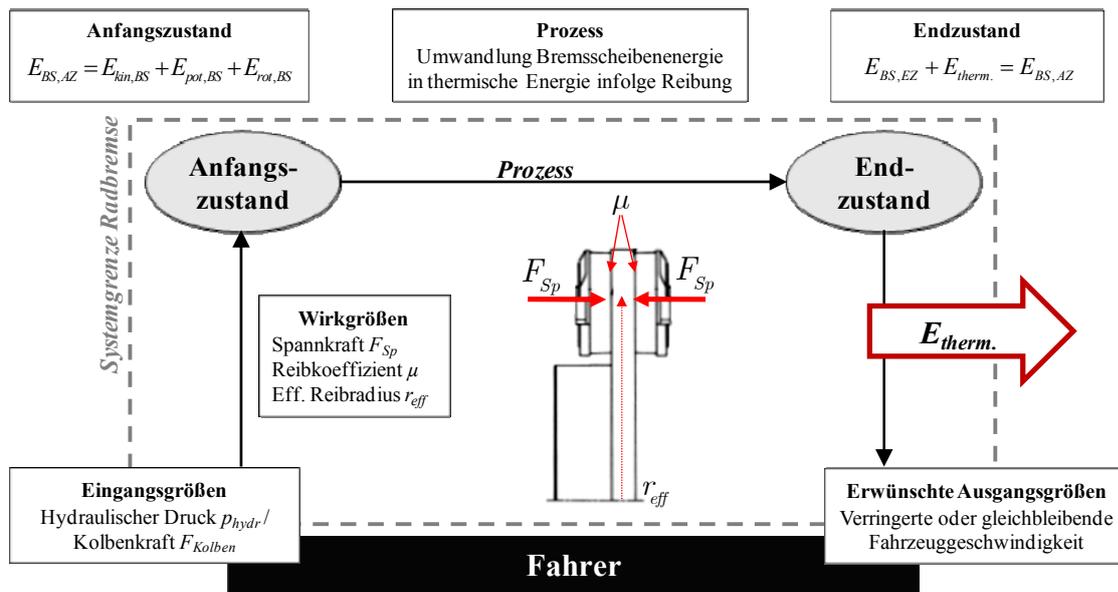


Abbildung 4.3: Vereinfachte erweiterte Prozessmodellldarstellung einer Scheibenbremse ohne Stör- und Nebengrößen

Aus der vereinfachten Prozessmodellldarstellung geht die mechanische Hauptfunktion einer Brems Scheibe hervor:

**Aufnahme der über die Beläge eingeleiteten Spannkräfte und Weiterleitung des erzeugten Bremsmoments über die Felge an den Reifen.**

Aus dem Wirkprinzip der mechanisch wirkenden Radbremse resultiert eine thermische Anforderung, die als zweite, thermische Hauptfunktion definiert wird:

**Aufnahme und Abgabe der beim Bremsvorgang in Wärme gewandelten Energie unter Beibehaltung der Bremsfunktion.**

#### 4.2.2 Eigenschaftsanalyse der Hauptfunktionen einer Brems Scheibe

Ziel der Eigenschaftsanalyse ist die Identifikation der funktions- und prozessbeeinflussenden Variationsparameter aus den Hauptfunktionen einer Brems Scheibe. Es werden die physikalischen Zusammenhänge analysiert und das System bzw. die Einzelkomponenten in Eigenschaften zerlegt. Berücksichtigt wird bei dieser Betrachtung auch der Einfluss potenzieller Stör- und Nebengrößen.

Eine wesentliche Unterscheidung erfolgt zwischen äußeren und inneren Eigenschaften. Als innere Eigenschaften werden nach Birkhofer<sup>134</sup> die elementaren, nicht mehr weiter unterteilbaren Eigenschaften einer Baugruppe oder eines Bauteils bezeichnet. Äußere Eigenschaften kennzeichnen die sichtbaren und messbaren Wirkungen eines Produkts auf sein Umfeld. Sie entstehen nach Birkhofer nicht aus sich selbst heraus, sondern lassen sich auf innere Eigenschaften oder eine Verknüpfungen von ihnen zurückführen.

#### 4.2.2.1 Eigenschaftsanalyse der mechanischen Hauptfunktion

Als Grundlage für die Anforderung „Bremsmoment übertragen“ werden die Zusammenhänge aus den Gleichungen (4.1) bis (4.4) (siehe S. 31) herangezogen. Das übertragene Bremsmoment bildet die übergeordnete äußere Eigenschaft. Aus den Wirkgrößen Spannkraft, Reibkoeffizient und dem effektiven Reibradius erfolgt die Ableitung der inneren Eigenschaften der Brems Scheibe für ein hydraulisches Bremssystem wie in Abbildung 4.4 schematisch dargestellt.

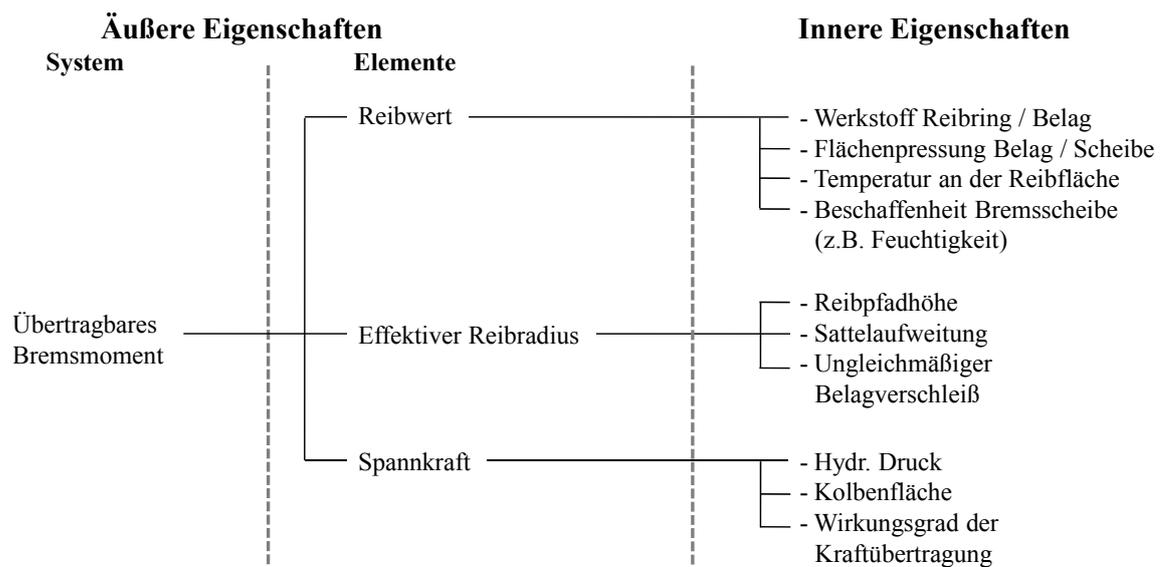


Abbildung 4.4: Ableitung der inneren Eigenschaften aus der mechanischen Hauptfunktion einer Brems Scheibe<sup>135</sup>

Der Reibwert  $\mu$  zwischen Bremsbelag und Brems Scheibe hängt neben statischen Einflussgrößen wie der Werkstoffpaarung von Belag und Scheibe von weiteren Faktoren ab, die von Leber<sup>136</sup> beschrieben werden. Hierzu zählen Einflüsse durch Änderung der

<sup>134</sup> Birkhofer, H.: Skriptum zur Vorlesung Produktentwicklung I, 2005, Kap. 7, S. 6 ff.

<sup>135</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an die Methodik von Birkhofer, H.: Skriptum zur Vorlesung Produktentwicklung I, 2005, Kap. 7, S. 7 (Detailbeschreibung siehe Text)

<sup>136</sup> Leber, M.: Radbremse mit mechatronischer Kennwertregelung – Untersuchung von Betriebsverhalten und Fahreranbindungsproblematik hinsichtlich Brake-by-Wire-Systemen, S. 29, 1998

Gleitgeschwindigkeit, Temperatur oder Flächenpressung sowie eine Reduzierung des Reibwertes durch ein Zwischenmedium wie beispielsweise Feuchtigkeit.

Der effektive Reibradius als Abstand zwischen Kraftangriffspunkt der Spannkraft und Radnabe bildet den Hebelarm für die Erzeugung des Bremsmoments. Unter Vernachlässigung der Elastizitäten in der Radbremse wird der Kraftangriffspunkt im Flächenschwerpunkt des Reibringkörpers angenommen.<sup>137</sup> Er lässt sich konstruktiv durch die Reibpfadhöhe ( $r_{\text{außen}}-r_{\text{innen}}$ ) der Bremsscheibe beeinflussen. Darüber hinaus ist er im Betrieb stark von Sattel- und Belagverhalten abhängig. Durch die endliche Sattelsteifigkeit führen die auftretenden Axialkräfte im Betrieb zu einer Aufweitung des Sattels und als Folge zu einer radialen Verschiebung des resultierenden Kraftangriffspunktes.<sup>138</sup>

Zu den Einflussfaktoren auf die Spannkraft gehören, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, die Kolbenfläche und der einwirkende hydraulische Druck, aus denen die Spannkraft resultiert. Weiterhin ist der Wirkungsgrad der Kraftübertragung, der Reibungsverluste auf dem Übertragungsweg zwischen Kolben und Bremsscheibe einbezogen, zu berücksichtigen.

Im Hinblick auf die mechanische Funktionserfüllung einer Bremsscheibe sind darüber hinaus Verformungen unter Einwirkung von Bremskraft und Temperatur zu berücksichtigen, die als Störgrößen wirken (vgl. Abschnitt 4.2.3) und zu unerwünschtem Systemverhalten führen können.<sup>139</sup> Als innere Eigenschaften sind in diesem Zusammenhang mechanische Werkstoffeigenschaften sowie die Bauteilgeometrie zu nennen. Die Einflüsse werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter vertieft.

#### 4.2.2.2 Eigenschaftsanalyse der thermischen Hauptfunktion

Die während des Bremsvorgangs in der Radbremse in Wärme gewandelte Fahrzeugenergie wird von der Bremsscheibe aufgenommen (Wärmespeicherung) und in der Folge an die Umgebung abgegeben. Die Wärmeübertragungsvorgänge setzen sich anteilig aus den thermodynamischen Prozessen Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion zusammen. Die Bremsscheibentemperatur, die in der Bremsscheibe als dreidimensionales, zeitabhängiges Feld vorliegt, bildet die zu dieser Funktion entsprechende äußere, messbare Eigenschaft. Darauf aufbauend ist in Abbildung 4.5 die Zerlegung der äußeren Eigenschaften dargestellt.

---

<sup>137</sup> Vgl. Degenstein, T.: Kraftmessung in Scheibenbremsen, 2007, S. 47

<sup>138</sup> Degenstein, T.: Kraftmessung in Scheibenbremsen, 2007, S. 20 f.

<sup>139</sup> Dreilich, L.; Pankau, J.; Schmeling, H.-J.: Analyse und Optimierung von Bremsscheibendeformationen unter Temperaturbelastung, 1992, S. 34

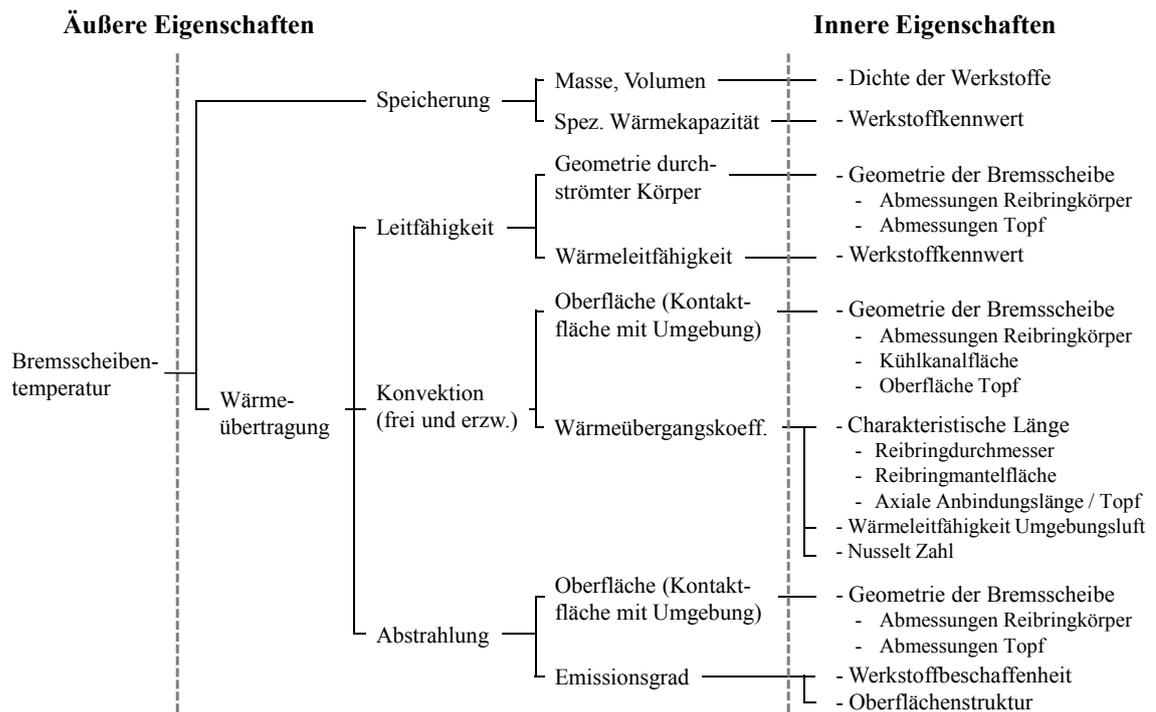


Abbildung 4.5: Ableitung der inneren Eigenschaften aus der thermischen Hauptfunktion einer Brems Scheibe<sup>140</sup>

Die *Wärmespeicherfähigkeit* der Brems Scheibe ist die wesentliche Eigenschaft, die die Höhe des aus dem Reibprozess resultierenden Temperaturanstiegs beeinflusst. Sie hängt gemäß Gleichung (4.10)<sup>141</sup> von der Dichte  $\rho$  bzw. der Masse  $m$  der verwendeten Werkstoffe sowie ihrer spezifischen Wärmekapazität  $c$  ab.

$$dQ = m \cdot c \cdot dT \quad (4.10)$$

Die Wärmeübertragung kann allgemein in stoffgebundene und nicht stoffgebundene Mechanismen unterteilt werden. Die *Wärmeleitung* gehört zu den stoffgebundenen Wärmeübertragungsmechanismen und beschreibt den Energietransport zwischen benachbarten Molekülen aufgrund eines im Material vorhandenen Temperaturgradienten.<sup>142</sup> Die mathematische Beschreibung der Wärmeleitung erfolgt durch die allgemeine Wärmeleitungsgleichung nach Fourier:<sup>143</sup>

$$a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}_q}{\rho c} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{mit} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (4.11)$$

<sup>140</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an die Methodik von Birkhofer, H.: Skriptum zur Vorlesung Produktentwicklung I, 2005, Kap. 7, S. 7 (Detailbeschreibung siehe Text)

<sup>141</sup> Vgl. Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure, 2002, S. 157

<sup>142</sup> Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 2

<sup>143</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 122

Die in Gleichung (4.11) auftretende Proportionalitätskonstante  $\lambda$  ist die Wärmeleitfähigkeit des Wärmekontakts und eine temperaturabhängige, für Fluide auch vom Druck abhängige, Materialkonstante.<sup>144</sup> Aus dem Wärmeleitungsterm werden als innere Eigenschaften die Wärmeleitfähigkeit sowie die Geometrie abgeleitet. Übertragen auf die Bremsscheibe können die Zusammenhänge durch Betrachtung eines Reibringsegments veranschaulicht werden. Hierfür gilt der vereinfachte Fall eines festen Körpers der Oberfläche  $A$  mit zwei im Abstand  $d$  zueinander angeordneten parallelen Wandflächen  $W_1$  und  $W_2$ , für den die Gleichung vereinfacht wird zu:<sup>145</sup>

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot (T_{W_1} - T_{W_2}) \quad (4.12)$$

Neben der Wärmeleitung gehört auch der konvektive Wärmetransport zu den stoffgebundenen Wärmeübertragungsmechanismen. Unter *Konvektion* wird allgemein die Wärmeübertragung zwischen zwei thermodynamischen Systemen verstanden, die sich relativ zueinander bewegen, wobei zwischen erzwungener und freier Konvektion differenziert wird.<sup>146</sup> Erzwungene Konvektion wird durch äußere Kräfte, z.B. eine Pumpe, hervorgerufen. Freie Konvektion entsteht als Folge von Dichteunterschieden, die ihrerseits auf Temperatur- oder Druckunterschiede zurückzuführen sind.<sup>147</sup> Auf die Bremsscheibe bezogen wirken zumeist beide Arten von Konvektion. Ausschließlich freie Konvektion liegt bei Windstille nur bei stehendem Fahrzeug vor. Die Berechnung des konvektiven Wärmestroms erfolgt sowohl für freie als auch für erzwungene Konvektion durch das Newton'sche Gesetz:<sup>148</sup>

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_W - T_\infty) \quad (4.13)$$

Die Temperaturdifferenz  $T_W - T_\infty$  bildet bezogen auf eine Bremsscheibe den Unterschied zwischen Oberflächentemperatur und Temperatur der umströmenden Luft außerhalb der Grenzschicht ab. Weitere Parameter sind der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  sowie die Wärmeübergangsfläche  $A$ , die entsprechend Abbildung 4.5 weiter in ihre inneren Eigenschaften zerlegt werden können. Die Wärmeübergangsfläche  $A$  beschreibt alle mit der Umgebungsluft in Kontakt stehenden Oberflächen der Bremsscheibe, insbesondere die Reibringoberflächen sowie den Bereich des Kühlkanals. Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$ , auch als Intensität des Wärmestroms beschrieben, stellt die charakteristische Größe für den konvektiven Wärmetransport dar.<sup>149</sup> Im Einzelnen hängt er von der Wär-

---

<sup>144</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 5

<sup>145</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 7

<sup>146</sup> Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure, 2002, S. 208

<sup>147</sup> Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 280

<sup>148</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 7

<sup>149</sup> Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas, 2006, A5-A6

meleitfähigkeit der Luft  $\lambda_L$ , der charakteristischen Länge  $L_{char}$  sowie der Nusselt-Zahl  $Nu$  ab (vgl. Gleichung (4.14)<sup>150</sup>).

$$\alpha = \frac{\lambda_L}{L_{char}} \cdot Nu \quad (4.14)$$

Im Gegensatz zu Wärmeleitung und Konvektion ist die Wärmeübertragung durch *Strahlung* nicht stoffgebunden, d.h. sie benötigt keine Materie als Energieträger. Für einen grauen Strahler in einer schwarzen Umgebung wird der abgegebene Wärmestrom  $\dot{Q}$  durch Gleichung (4.15)<sup>151</sup> beschrieben.

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_U^4) \quad (4.15)$$

Neben der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$  sind weitere variable Größen für die inneren Eigenschaften der Brems Scheibe relevant. Hierzu zählen die wärmeabstrahlende Oberfläche  $A$  sowie der Emissionsgrad  $\varepsilon$ , der von der Natur der Oberfläche abhängt.<sup>152</sup>

### 4.2.3 Einfluss von Stör- und Nebengrößen

Neben den für die Funktionen relevanten Wirkgrößen existieren Störgrößen und Nebengrößen, aus denen weitere Anforderungen hinsichtlich der Auslegung der Scheibenbremse abgeleitet werden können. Diese ergänzen das Prozessmodell und die funktionale Beschreibung einer Brems Scheibe. Die Definition der beiden Begriffe erfolgt in Anlehnung an Birkhofer.<sup>153</sup> Demnach wirken **Störgrößen** von außen auf das System und können die Funktion negativ beeinflussen, von einer Beeinträchtigung bis hin zum Funktionsausfall. Im Gegensatz hierzu entstehen **Nebengrößen** aus dem Prozess selbst. Die resultierenden Wechselwirkungen wirken auf die Systemkomponenten oder den Prozess selbst und können ebenfalls negative Auswirkungen haben. Basierend auf dem Stand der Forschung und Technik werden nachfolgend die für eine Scheibenbremse relevanten Stör- und Nebengrößen dargestellt. In Abhängigkeit ihrer Ursache erfolgt eine Einteilung in drei Kategorien.

- Aus Umgebungseinflüssen resultierende Störgrößen
- Aus dem Prozess entstehende Nebengrößen
- Ursprünglich vorliegende Stör- und Nebengrößen

---

<sup>150</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 20

<sup>151</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 32

<sup>152</sup> Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas, 2006, A3

<sup>153</sup> Birkhofer, H.: Skriptum zur Vorlesung Produktentwicklung I, 2005, Kap. 2, S. 22 f.

Die aus den Stör- und Nebengrößen resultierende Wirkung wird ebenfalls in drei Kategorien unterteilt.

- 1) *Funktionskritisch*: Die Funktionserfüllung ist nicht gewährleistet.
- 2) *Wirkkritisch*: Die Funktionserfüllung ist gewährleistet, aber quantitative und qualitative Einschränkungen sind zu erwarten.
- 3) *Komfortkritisch*: Die Wirkung ist störend, ein Einfluss auf die Funktionserfüllung ist nicht zu erwarten.

Entsprechend dieser Gliederung zeigen Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 zusammenfassend die Ursache-Wirkungs-Beziehungen von Stör- und Nebengrößen einer Scheibenbremse.

Tabelle 4.1: Ursache-Wirkungs-Beziehungen von Störgrößen einer Scheibenbremse<sup>154</sup>

	Ursache	Wirkung / Wirkungskette	Kat. *)	
<b>Ursprünglich vorliegende Störgrößen</b>	DTV aus Fertigungsprozess	Kaltrubbeln	2, 3	
	Scheibenschlag aus Fertigungsprozess	Schrägverschleiß, DTV, Kaltrubbeln	2, 3	
<b>Von außen wirkende Störgrößen - Umgebungseinflüsse</b>	Feuchtigkeit / Eis	Reibwertabfall durch Nässefäding	2	
	Streusalz in Verbindung mit Feuchtigkeit	Korrosion	Mechanisches Versagen	1
			Beeinträchtigung der Sattelfunktion	1, 2
			Beschädigungen durch Belagkleben	2
	Schmutz / Fremdkörper (z.B. Sand, kleine Steine)	Beeinträchtigung der Sattelfunktion		1, 2
Riefenbildung (Belag/Scheibe)			2, 3	

\*) **1 = Funktionskritisch**: Kein Bremsmoment mehr, keine Wärmeabfuhr

**2 = Wirkgrößenkritisch**: Maximales Bremsmoment wird nicht oder nur durch höheren Aufwand erreicht, Wärmeabfuhr erfolgt langsamer

**3 = Komfortkritisch**: Störend für Fahrer

Bereits bei Neuteilen von Brems Scheiben existieren produktseitig **Störgrößen**, die sich negativ auf den Prozess auswirken können. Die Ursache liegt im toleranzbehafteten Fertigungsprozess, aus dem geometrische Abweichungen verbleiben wie Scheibendickenschwankungen (Disc Thickness Variation – DTV) oder ein axialer Scheibenschlag.<sup>155</sup> Im Betrieb können diese geometrischen Imperfektionen zu ungleichmäßigem Verschleiß (Scheibenschlag) oder sogenanntem Kaltrubbeln führen, was auditiv und

<sup>154</sup> Eigene Darstellung, Detailbeschreibung mit Quellenangaben siehe entsprechenden Textabschnitt

<sup>155</sup> Schumann, M.: Analysemethode zur Beurteilung des ungleichförmigen Brems Scheibenverschleißes an Pkw-Scheibenbremsen, 2007, S. 13

haptisch für den Fahrer wahrnehmbar ist.<sup>156</sup> Als weitere Störgrößen sind witterungsbedingte Umgebungseinflüsse zu nennen, die sowohl auf das Produkt als auch auf den Prozess wirken.<sup>157</sup> Insbesondere Feuchtigkeit sowie eindringende Fremdkörper in Form von Sand oder kleineren Steinen können zu einem unerwünschten Systemverhalten, beispielsweise durch Geräusche, führen. Der Einsatz von Bremsabschirmblechen zielt auf eine Reduzierung der negativen Auswirkungen ab.<sup>158</sup>

Tabelle 4.2: Ursache-Wirkungs-Beziehungen von Nebengrößen einer Scheibenbremse<sup>159</sup>

	Ursache	Wirkung / Wirkungskette	Kat. *)	
<b>Aus dem Prozess entstehende Nebengrößen</b>	Temperaturanstieg aus Energieumwandlung	Wärmestrahlung / Wärmeleitung	Überhitzung angrenzender Systemkomponenten (z.B. Bremsflüssigkeit)	1, 2
		Wärmedehnung ist zu beachten hinsichtlich Auslegung der Feststellbremse. Gefahr der Spannkraftreduzierung nach Heißabstellen in Folge abnehmender Wärmedehnung.		1, 2, 3
		Reibwertabfall durch thermisches Fading		2, 3
		Schirmung	Schrägverschleiß	2
			Restbremsmomente	2, 3
		Verwellung der Brems Scheibe	Heißrubbeln	2, 3
	Sattelaufweitung aus Sattellelastizität	Anstieg Volumenaufnahme / Verlängerung Pedalweg (Pedalgefühl)		3
		Schrägverschleiß		2
	System-/ prozessbedingte Schwingungsanregung	Hochfrequente Geräusche (z.B. Quietschen)		3
	DTV aus Verschleiß	Niederfrequente Geräusche (z.B. Rubbeln)		3
	Verschleiß	Abrieb, Ablagerungen von Bremsstaub		3

\*) 1 = **Funktionskritisch**: Kein Bremsmoment mehr, keine Wärmeabfuhr

2 = **Wirkgrößenkritisch**: Maximales Bremsmoment wird nicht oder nur durch höheren Aufwand erreicht, Wärmeabfuhr erfolgt langsamer

3 = **Komfortkritisch**: Störend für Fahrer

Weiterhin entstehen aus dem Prozess **Nebengrößen**, die zu Wechselwirkungen mit den Systemkomponenten und in der Folge zu negativen Effekten führen können. In diesem Zusammenhang sind vor allem thermisch bedingte Phänomene von Bedeutung. Als

<sup>156</sup> Schumann, M.: Analyseverfahren zur Beurteilung des ungleichförmigen Brems Scheibenverschleißes an Pkw-Scheibenbremsen, 2007, S. 11

<sup>157</sup> Eichhorn, U.; Fuhrmann, K. H.: Fahrzeugtechnische Anforderungen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 34 f.

<sup>158</sup> Burckhardt, M.: Fahrwerktechnik: Bremsdynamik und Pkw-Bremsanlagen, 1991, S. 183

<sup>159</sup> Eigene Darstellung, Detailbeschreibung mit Quellenangaben siehe entsprechenden Textabschnitt

Folge von Wärmestrahlung und Wärmeleitung bei unzureichender Abschirmung besteht die Gefahr der Überbelastung angrenzender Systemkomponenten wie beispielsweise der Bremsflüssigkeit. Die daraus resultierende Bildung von Dampfblasen innerhalb des Hydraulikkreises kann zum Funktionsausfall führen.<sup>160</sup> Weitere thermisch bedingte Effekte sind der Reibwertabfall zwischen Belag und Scheibe (Fading) oder thermisch bedingte Verformungen (Schirmung, Verwellung), die zu unerwünschtem Systemverhalten führen.<sup>161,162</sup> Neben den genannten Effekten, die sich negativ auf die Komponenten beziehungsweise auf den Prozess auswirken, existieren Nebengrößen, die unkritisch im Hinblick auf die Erfüllung der Hauptfunktionen sind, jedoch eine Komfortbeeinträchtigung für den Fahrer darstellen. Hierzu zählen vor allem Bremsgeräusche und Rubbelerscheinungen, die zudem noch haptisch für den Fahrer wahrnehmbar sind.<sup>163</sup> Abbildung 4.6 zeigt das um die Stör- und Nebengrößen erweiterte Prozessmodell.

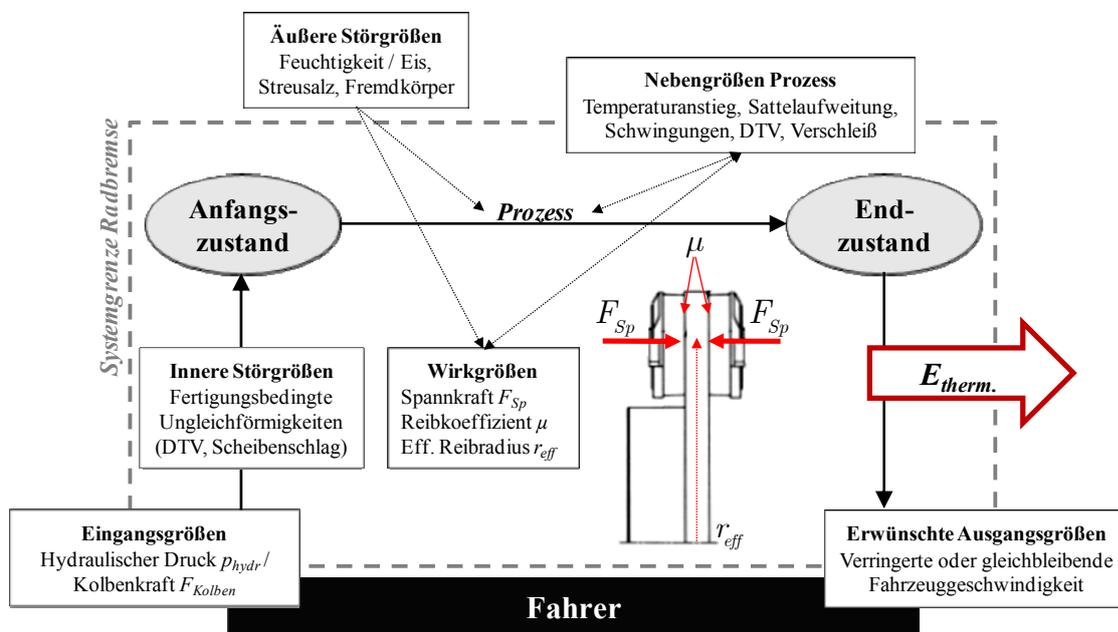


Abbildung 4.6: Erweiterte Prozessmodellardarstellung einer Scheibenbremse mit Stör- und Nebengrößen

<sup>160</sup> Eichhorn, U.; Fuhrmann, K. H.: Fahrzeugtechnische Anforderungen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006

<sup>161</sup> Eichhorn, U.; Fuhrmann, K. H.: Fahrzeugtechnische Anforderungen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006

<sup>162</sup> Sardá, A. H.: Wirkungskette der Entstehung von Hotspots und Heißrubbeln in Pkw-Scheibenbremsen, 2009

<sup>163</sup> Brunner, H.; Koch, L.: Schwingungen und Geräusche. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006

## 4.2.4 Funktionsstruktur einer Bremsscheibe – Zerlegung in Teilfunktionen

Aus den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel werden nachfolgend die Teilfunktionen einer Bremsscheibe abgeleitet. Entsprechend der Hauptfunktionen wird zwischen mechanischen und thermischen Funktionsumfängen differenziert.

### 4.2.4.1 Mechanische Funktionsumfänge

Die mechanischen Funktionsumfänge basieren auf der Erzeugung des Bremsmoments sowie der Weiterleitung an das Rad. Tabelle 4.3 enthält die abgeleiteten Teilfunktionen sowie die für die Funktionserfüllung erforderlichen Teile einer Bremsscheibe. Als Referenz wird von einer einteiligen Bremsscheibe ausgegangen.

Tabelle 4.3: Beschreibung der Teilfunktionen für die Hauptfunktion *Bremsmoment aufbauen* und *Bremsmoment leiten*

	Teilfunktion	Beschreibung	Relevanter Bremsscheibenbereich
<b>Bremsmoment aufbauen / Bremsmoment leiten</b>	<b>Reibwert aufbauen</b>	Aufbau eines stabilen Gleitreibungsmechanismus zwischen Belag und Scheibe. Die Höhe des Reibwertes hängt unter anderem von der Materialpaarung sowie Temperatur und Flächenpressung ab.	Oberflächen beider Reibringe 
	<b>Spannkraft aufnehmen</b>	Aufnahme der aufgebauten Spannkräfte. Ausreichende Druckfestigkeit des Reibringkörpers erforderlich.	Gesamstruktur des Reibringkörpers (Reibringkörper + Kühlkanal) 
	<b>Bremsmoment leiten</b>	Weiterleitung der Spannkräfte von der Oberfläche in den Grundkörper (ggf. über den Kühlkanal) und über die Topfanbindung in den Topf. Krafteinleitung in das Rad.	Gesamte Bremsscheibe 

Die Ergebnisse aus Tabelle 4.3 für die Funktion „*Bremsmoment aufbauen und leiten*“ sind auf massive Bremsscheiben und Verbundbremsscheiben übertragbar. Neben Bremsmomentaufbau und Bremsmomentleitung ist auf mechanischer Seite die Verschleißfunktion zu berücksichtigen (siehe Tabelle 4.4). Bedingt durch das Wirkprinzip der Reibungsbremse entsteht im Betrieb Materialabtrag, der bei der Auslegung des Reibringkörpers vorzuhalten ist.

Tabelle 4.4: Beschreibung der Teilfunktion *Verschleiß*

	Teilfunktion	Beschreibung	Relevanter Brems scheibenbereich
<b>Verschleiß</b>	<b>Verschleiß durch Reibung</b>	Infolge Reibung zwischen Bremsbelag und Brems scheibe entsteht an den beteiligten Komponenten mechanischer Verschleiß (Abrieb).	In Abhängigkeit der Dicke des Reibringkörpers und der Festigkeitsanforderungen ca. 0,5-1,5 mm / Seite
			

#### 4.2.4.2 Thermische Funktionsumfänge

Aus der thermischen Hauptfunktion einer Brems scheibe und der durchgeführten Eigenschaftsanalyse werden in Tabelle 4.5 die Teilfunktionen dargestellt, die in Wärmespeicherung und Wärmeübertragung unterteilt sind. Die für die Teilfunktionen relevanten Brems scheibenbereiche sind von der dargestellten einteiligen Ausführung auf massive Brems scheiben sowie Brems scheiben in Verbundbauweise übertragbar.

Tabelle 4.5: Beschreibung der *thermischen* Teilfunktionen

	Teilfunktion	Beschreibung	Relevanter Brems scheibenbereich
<b>Wärme- speicherung</b>	<b>Wärme speichern</b>	Die Wärmespeicherung ist abhängig von der Wärmekapazität der Brems scheibe. Diese kann durch die spezifische Wärmekapazität der Werkstoffe sowie die Geometrie der Brems scheibe beschrieben werden.	Gesamte Brems scheibe
			
<b>Wärmeübertragung</b>	<b>Wärme leiten</b>	Weiterleiten der Wärme vom Ort des Energieeintrags in kühlere Bereiche der Brems scheibe. Die Wärmeleitung hängt vor allem von den eingestetzten Werkstoffen sowie vom durch die Geometrie bestimmten Wärmeleitwiderstand ab.	Gesamte Brems scheibe
	<b>Wärmeabgabe durch Konvektion</b>	Die Abgabe der Wärme erfolgt an die Umgebungsluft über die mit ihr in Kontakt stehenden Oberflächen. Die Höhe des konvektiven Wärmetransports hängt von der Größe der Oberfläche sowie von den Eigenschaften der Luft als wärmeaufnehmendes Medium ab.	Oberflächen der Brems scheibe, die in Kontakt mit der Umgebungsluft stehen
	<b>Wärmeabgabe durch Strahlung</b>	Die Höhe der abgegebenen Wärmestrahlung hängt neben der Brems scheibentemperatur von der Oberfläche sowie vom Abstrahlungsvermögen ab.	Oberflächen der Brems scheibe, die eine freie Abstrahlung in den Raum ermöglichen

## 4.3 Fazit

Ausgehend von der Wirkungskette einer Fahrzeugbremse sind in diesem Kapitel die Hauptfunktionen einer Scheibenbremse identifiziert worden.

- *Aufnahme der über die Beläge eingeleiteten Spannkkräfte und Weiterleitung des erzeugten Bremsmoments über die Felge an den Reifen.*
- *Aufnahme und Abgabe der beim Bremsvorgang in Wärme gewandelten Energie unter Beibehaltung der Bremsfunktion.*

Die Hauptfunktionen sind in einem Prozessmodell dargestellt und um die den Prozess und die Produkteigenschaften negativ beeinflussenden Stör- und Nebengrößen erweitert.

Die Eigenschaftsanalyse der beiden Hauptfunktionen verdeutlicht die Abhängigkeit der Funktionserfüllung von der geometrischen Gestaltung der Bremsscheibe sowie von materialspezifischen Kenngrößen. Die in diesem Zusammenhang für die Funktionserfüllung relevanten und parametrierbaren Größen resultieren aus den Eigenschaften der Bremsscheibe. Die äußeren Eigenschaften und somit auch die Erfüllung der Hauptfunktionen werden im Entwicklungsprozess durch die variablen inneren Eigenschaften definiert. Neben der Funktionserfüllung wird durch die Definition geometrischer und werkstofftechnischer Parameter die Masse der Bremsscheibe festgelegt.

Auf Basis der Ergebnisse aus Prozessmodell und Eigenschaftsanalyse liegen alle relevanten Auslegungsparameter, die zur Erfüllung der definierten Hauptfunktionen erforderlich sind, vor. Weiterhin können anhand der Eigenschaftsgliederung bestehende Wechselwirkungen zwischen Parametern aufgezeigt werden. Eine Quantifizierung der Parametereinflüsse im Hinblick auf die zu erfüllende Funktion ist unter Berücksichtigung variabler Randbedingungen, wie beispielsweise dem Energieeintrag, aufgrund der Komplexität ohne weitere Analysemaßnahmen nur schwer möglich. Insbesondere die für die thermische Funktionalität bestehenden Wechselwirkungen zwischen funktionalen und leichtbaurelevanten Parametern erfordern weitergehende Untersuchungen, die in Kapitel 6 erfolgen.

## 5 Systematik von Bremsscheiben

Aufbauend auf den Ergebnissen der funktionalen Analyse im vorangegangenen Kapitel wird nachfolgend eine Systematik von Bremsscheiben entwickelt. Die Verwendung des Begriffs Systematik erfolgt in dieser Arbeit in Anlehnung an die Definition von Pahl<sup>164</sup> und Beitz. Danach bezeichnet Systematik die ganzheitliche Betrachtung mit „ordnenden Gesichtspunkten bzw. Merkmalen“. Ziel der Systematik in der vorliegenden Arbeit ist eine allgemeine Lösungsraumdarstellung von Bremsscheiben auf Basis zuvor definierter Ordnungskriterien zu realisieren. Die entwickelte Systematik bildet in dieser Arbeit die Grundlage für die Ableitung neuartiger Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben.

### 5.1 Randbedingungen und Struktur

#### 5.1.1 Randbedingungen

Im Rahmen der Zielsetzung dieser Arbeit ist für die zu entwickelnden Bremsscheibenkonzepte die Anforderung nach einer Eignung für den Serieneinsatz formuliert worden. Daraus werden Randbedingungen für die Erstellung der Systematik abgeleitet, die zu einer Reduzierung der Lösungsvielfalt führen. Die betrachteten Konzepte setzen die Eignung für eine Teilbelagscheibenbremse mit bekannten typischen Sattelkonzepten wie Schwimm- oder Festsattel voraus. Konzepte mit innumgreifendem Sattel, wie sie beispielsweise im Audi V8 (Typ 4C) zum Einsatz kamen, wurden durch die Weiterentwicklung der konventionellen Bauarten verdrängt<sup>165</sup> und werden daher nicht berücksichtigt. Hinsichtlich der Bremsscheibenkühlung werden im Lösungsraum keine Konzepte mit Fremdbelüftung oder Flüssigkeitskühlung betrachtet.

#### 5.1.2 Kriterien zur Klassifizierung und Strukturierung

Die Bremsscheiben-Systematik wird als Struktur mit ordnenden Klassifizierungskriterien verstanden, auf deren Basis die Ableitung neuartiger Bremsscheibenkonzepte möglich ist. Die Erstellung der Systematik erfolgt unter Einbeziehung lösungsbeeinflussender Merkmale wie sie in Abbildung 5.1 dargestellt sind.

---

<sup>164</sup> Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz. – Konstruktionslehre, 2007, S. 785

<sup>165</sup> Remfrey, J.; Gruber, S.; Ocvirk, N.: Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 98 f.

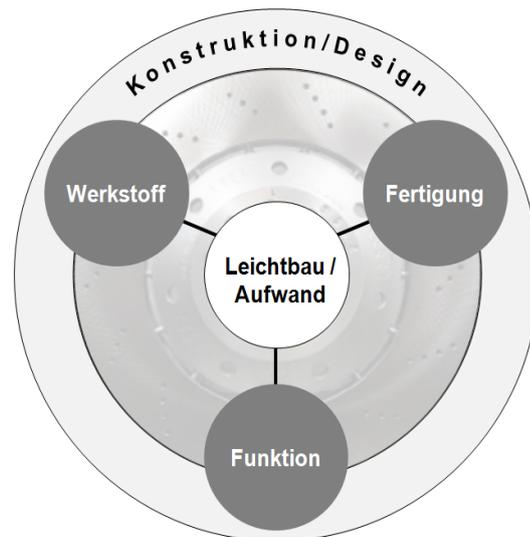


Abbildung 5.1: Anforderungen und Variationsmerkmale im Rahmen einer Brems scheiben-Konstruktion

Die in Abbildung 5.1 zentral angeordneten Merkmale **Leichtbau** und **Aufwand** bilden die aus der Aufgabenstellung dieser Arbeit hervorgehenden Zielgrößen, die aber nur indirekt durch andere Merkmale beeinflusst werden können. Hierzu gehören vor allem die in Kapitel 4.2 beschriebenen **Funktionen** und **Teilfunktionen** einer Brems scheibe, die als Variationsmerkmale in die Strukturierung der Systematik einfließen. Komfort- und störgrößenbeeinflussende Parameter werden nicht als Variationsmerkmal in der Systematik berücksichtigt, werden jedoch in den Diskussionen der realisierten Konzepte aufgegriffen. Aus dem Ansatz der funktionalen Trennung bei aktuellen Leichtbau-Brems scheiben werden die verwendeten **Werkstoffe**, deren Parameter in den inneren Eigenschaften in Kapitel 4.2.2 dargestellt sind, als weiteres Variationsmerkmal definiert. Das Prinzip der funktionalen Trennung bedingt häufig eine mehrteilige Ausführung der Brems scheiben, die eine Herstellung in mehreren Schritten und gegebenenfalls unter Nutzung verschiedener Fertigungsverfahren erfordert. Aufgrund der entstehenden Variationsmöglichkeiten und dem Aspekt einer wirtschaftlichen Fertigung werden **Fertigungs-** und **Fügetechnik** in die Systematik einbezogen. Die **konstruktive Ausgestaltung**, die auch die inneren geometrischen Eigenschaften einschließt, wird als übergeordnetes Merkmal betrachtet und durch geometrische Variationsmerkmale in der Systematik berücksichtigt. Die Ausprägungen der ausgewählten Variationsmerkmale werden nachfolgend erläutert.

### Brems scheibenkomponenten

Unabhängig von funktionalen Kriterien ist eine Einteilung in Brems scheibenbereiche möglich. Eine bewährte Darstellungsmöglichkeit resultiert aus der bereits in Kapitel 2.2.1 vorgenommenen Aufteilung in Teilkomponenten einer Brems scheibe (Reibring/Reibringkörper, Kühlkanal, Anbindung, Topf).

Funktion

Die in Kapitel 4.2 abgeleiteten Haupt- und Teilfunktionen einer Brems scheibe werden unter dem Variationsmerkmal Funktion zusammengefasst und sind in Abbildung 5.2 dargestellt.

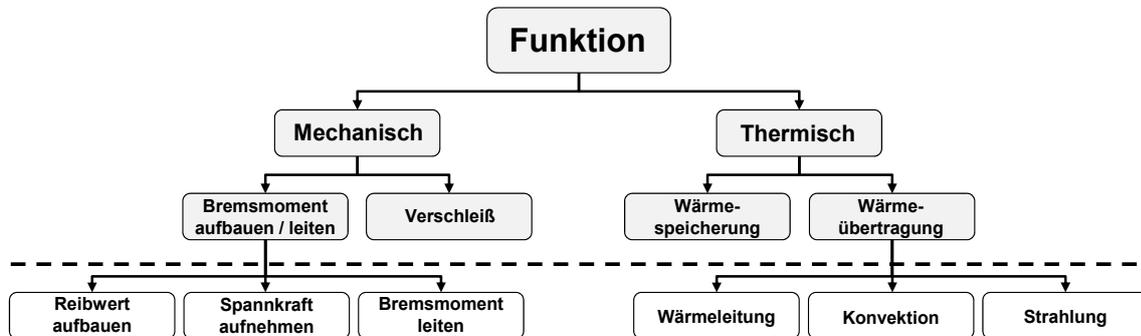


Abbildung 5.2: Funktionsgliederung mit Hauptfunktionen und Teilfunktionen

Werkstoff

Die Einbeziehung verschiedener Werkstoffe als funktionsbeeinflussende Variationsmerkmale erfolgt auf Basis einer zuvor definierten Gruppierung. Abbildung 5.3 zeigt die verwendete Werkstoffteilung in vier Gruppen wie sie auch in der Literatur<sup>166,167</sup> Anwendung findet. Alternativ sind auch andere Unterteilungen möglich wie beispielsweise von Grieve<sup>168</sup> beschrieben (vgl. Kapitel 2.4).

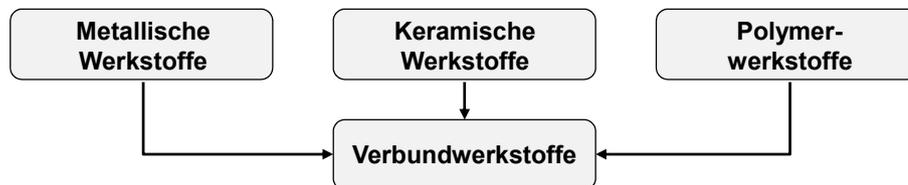


Abbildung 5.3: Systematik der Werkstoffe

In Abhängigkeit der Zielsetzung der Konstruktionsaufgabe ist eine unterschiedliche Priorisierung der Werkstoffparameter möglich (z.B. Dichte, thermische/mechanische Eigenschaften oder Materialkosten).

<sup>166</sup> Weißbach, W.: Werkstoffkunde, 2007, S. 2

<sup>167</sup> Hornbogen, E.; Eggeler, G.; Werner, E.: Werkstoffe, 2008, S. 8 ff.

<sup>168</sup> Grieve, D.; Barton, D. C.; Crolla, D. A.; Buckingham, J. B.; Chapman, J.: Investigation of Light Weight Materials for Brake Rotor Applications, 1995, S. 64

Fertigungsverfahren

Insbesondere bei mehrteiligen Brems scheiben entstehen Variationsmöglichkeiten durch die Wahl der Fertigungsverfahren. Neben der Fertigung der Brems scheibe oder ihrer Einzelkomponenten zeigt der aktuelle Stand der Technik, dass die ausgewählte Verbindungstechnik den Fertigungsaufwand und somit auch die Kosten beeinflusst. Weiterhin ist durch die Verbindungsgestaltung der Einzelkomponenten einer Verbundbrems scheibe auch eine positive Beeinflussung des Betriebsverhaltens möglich (vgl. Kapitel 2.2.3, Verbundbrems scheibe mit Stiftverbindung). Als übergeordnetes Variationsmerkmal werden die Hauptgruppen der Fertigungsverfahren entsprechend der Einteilung nach DIN 8580 gewählt (vgl. Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren mit Definitionen nach DIN 8580<sup>169</sup>

<b>Hauptgruppen</b>					
(1) <i>Urformen</i>	(2) <i>Umformen</i>	(3) <i>Trennen</i>	(4) <i>Fügen</i>	(5) <i>Beschichten</i>	(6) <i>Stoffeigen- schaft ändern</i>
<b>Definitionen</b>					
Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff	Plastisches Ändern der Form eines festen Körpers	Formändern eines festen Körpers durch örtliches Aufbringen des Zusammenhalts	Zusammenbringen von Werkstücken auch mit formlosem Stoff	Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff	Ändern der Eigenschaften des Werkstoffs, z.B. durch Diffusion, chem. Reaktion, Gitterversetzungen

Weitere Variationsmerkmale ergeben sich bei mehrteiligen Brems scheiben aus der Einbeziehung der Verbindungstechnik. In diesem Zusammenhang wird eine Unterscheidung der Schlussart sowie des eingesetzten Fügeverfahrens vorgenommen. Abbildung 5.4 zeigt die verwendete Einteilung für Schlussarten von Verbindungen. Die Darstellung und nachfolgende Beschreibung der Schlussarten erfolgt in Anlehnung an die Definitionen von Pahl<sup>170</sup> und Beitz.

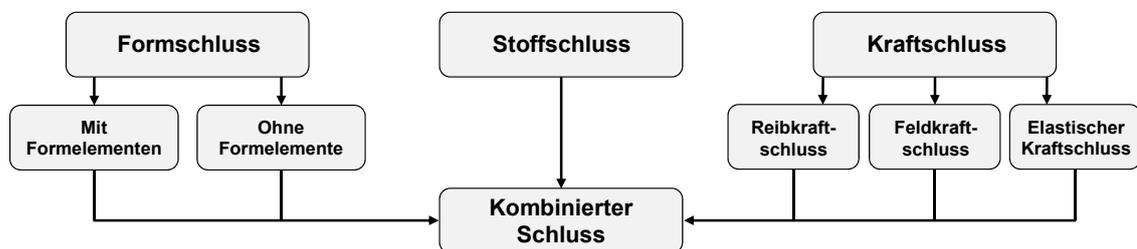


Abbildung 5.4: Systematik der Verbindungen

<sup>169</sup> Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580, vgl. Fritz, A. H.; Schulze G. (Hrsg.): Fertigungstechnik, 2008, S. 2

<sup>170</sup> Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz. – Konstruktionslehre, 2007, S. 581 ff.

Bei **formschlüssigen Verbindungen** erfolgt der Schluss durch Normalkräfte an ineinandergreifenden Wirkflächen von Elementen. Hierbei ist zwischen einer unmittelbaren Verbindung und einer Verbindung über Formelemente zu unterscheiden. Weitere Differenzierungsmerkmale resultieren aus Form, Anzahl, Lage und der Größe der Wirkflächenpaare. **Stoffschlüssige Verbindungen** sind durch das stoffliche Vereinigen der zu verbindenden Teile mit oder ohne Zusatzwerkstoff gekennzeichnet. Analog zu den formschlüssigen Verbindungen erfolgt eine weitere Differenzierung nach Form, Lage, Größe und Anzahl der Fügeflächen. Unter **kraftschlüssigen Verbindungen** werden Reibkraft- und Feldkraftschluss sowie der elastische Kraftschluss zusammengefasst. Bei reibkraftschlüssigen Verbindungen erfolgt der Schluss durch Reibungskräfte, die als Folge von Normalkräften an den Wirkflächenpaaren entstehen. Neben der Reibungszahl ist die Anzahl der Wirkflächen ein wichtiges Differenzierungsmerkmal. Der elastische Kraftschluss ist durch zwischengeschaltete elastische Elemente gekennzeichnet, die bei Verformungen als Energiespeicher wirken und Lage sowie dynamisches Verhalten der angeschlossenen Bauteile beeinflussen. Die Betrachtung des Feldkraftschlusses wird für die zu erstellende Systematik nicht weiter berücksichtigt. Aus den drei beschriebenen übergeordneten Schlussarten resultiert die Gruppe der **kombiniert-schlüssigen Verbindungen**, die durch eine Verknüpfung von Schlussarten gekennzeichnet ist.

Ergänzend zu den Schlussarten wird eine Einteilung nach den Fügeverfahren vorgenommen. Die Fügeverfahren werden aus der Hauptgruppe 4 „Fügen“ der DIN 8580<sup>171</sup> abgeleitet und sind in Anlehnung an die DIN 8593<sup>172</sup> in Tabelle 5.2 dargestellt. Eine ausführliche Darstellung mit Untergruppen ist in Anhang 13.2 dokumentiert.

Tabelle 5.2: Auszug aus DIN 8593 – Hauptgruppe 4 der Fertigungsverfahren mit Gruppen

Fertigungsverfahren – Hauptgruppe (4) Fügen							
Gruppen							
(4.1) <i>Zusammen- setzen</i>	(4.2) <i>Füllen</i>	(4.3) <i>An- und Einpressen</i>	(4.4) <i>Fügen durch Urformen</i>	(4.5) <i>Fügen durch Umformen</i>	(4.6) <i>Fügen durch Schweißen</i>	(4.7) <i>Fügen durch Löten</i>	(4.8) <i>Kleben</i>

<sup>171</sup> DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung, 2003

<sup>172</sup> DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 0 bis Teil 8, 2003

## 5.2 Abgeleitete Brems scheibensystematik

Ausgehend von der Darstellung des gewählten Systematisierungsansatzes werden in diesem Abschnitt die einzelnen Lösungsebenen beschrieben, mit dem Ziel eine strukturierte Ableitung von Brems scheibenkonzepten zu ermöglichen.

### 5.2.1 Gewählte Systematisierungsmethodik

Im vorangegangenen Abschnitt wurden vier Strukturierungsmerkmale von Brems scheiben dargestellt, die in die Systematik einfließen. Für die Systematisierung wird ein mehrstufiger Ansatz verfolgt, der schematisch in Abbildung 5.5 dargestellt ist.



Abbildung 5.5: Schematische Darstellung des gewählten Systematisierungsansatzes

Die Betrachtung auf **Komponentenebene** erfolgt ausgehend von der funktionalen Minimalstruktur einer Brems scheibe. In Anlehnung an Birkhofer<sup>173</sup> wird unter einer Minimalstruktur die einfachste Funktionsstruktur zur Erfüllung der geforderten Gesamtfunktion verstanden. Darauf aufbauend bietet die Zerlegung in Brems scheibenbereiche in Verbindung mit der Zuordnung von Teilfunktionen eine erste Möglichkeit zur Ableitung von Brems scheibenkonzepten. Auf **Funktionsebene** erfolgt eine Variation der Teilfunktionen unter Einbeziehung der inneren Eigenschaftsmerkmale wie Werkstoff- oder Geometrieparameter. Aus den dargestellten Strukturen können einteilige wie auch mehrteilige Brems scheiben abgeleitet werden. Für mehrteilige Brems scheiben ergeben sich in Bezug auf **Verbindungsgestaltung** sowie **Fertigungstechnik** zusätzliche Variationsmöglichkeiten, die in einem weiteren Lösungsraum abgebildet werden. Für die Ableitung von Brems scheibenkonzepten sind die genannten drei Lösungsebenen ergänzend zueinander zu sehen. Nachfolgend werden die Inhalte der drei Lösungsebenen sowie die Beziehungen zueinander im Detail diskutiert.

<sup>173</sup> Birkhofer, H.: Skriptum zur Vorlesung Produktentwicklung I, 2005, Kap. 4, S. 11

## 5.2.2 Komponentenebene

Die Minimalstruktur einer Bremsscheibe bildet die massive (Grauguss-)Bremsscheibe. Bereits die Integration des Kühlkanals zur Realisierung von belüfteten (einteiligen) Bremsscheiben stellt eine Erweiterung der Minimalstruktur dar. Aufgrund der Bedeutung in aktuellen Fahrzeugen wird die belüftete Bremsscheibe in die Betrachtung einbezogen. Ausgehend von der minimalen Funktionsstruktur werden den einzelnen Bremsscheibenbereichen Teilfunktionen zugeordnet. Die Unterteilung der Bremsscheibe erfolgt hierbei in die drei Bereiche Reibringkörper mit Kühlkanal, Anbindung und Topf. Tabelle 5.3 zeigt die Zuordnung der Teilfunktionen zu den drei Bremsscheibenbereichen.

Tabelle 5.3: Funktionale Minimalstruktur einer Bremsscheibe – Zuordnung der Teilfunktionen zu den Bremsscheibenbereichen

	Bremsscheibenbereich	Zugeordnete Teilfunktionen
<b>Massive / einteilige Bremsscheibe</b>	<b>Reibringkörper</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verschleißfunktion</li> <li>• Bremsmoment aufbauen                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reibwert aufbauen</li> <li>- Spannkraft aufnehmen</li> </ul> </li> <li>• Bremsmoment leiten</li> <li>• Wärme speichern</li> <li>• Wärme übertragen</li> </ul>
	<b>Anbindung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bremsmoment leiten</li> <li>• Wärme übertragen</li> <li>• Wärme speichern</li> <li>• (Verbindung Reibringkörper – Topf)</li> </ul>
	<b>Topf</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bremsmoment leiten</li> <li>• Wärme übertragen</li> <li>• Wärme speichern</li> <li>• (Anbindung an Rad/Radnabe)</li> </ul>

Der Einfluss der Wärmespeicherung im Anbindungs- und Topfbereich ist im Vergleich zum Reibringkörper von untergeordneter Bedeutung, wird in der obigen Darstellung jedoch aus Gründen der Vollständigkeit berücksichtigt. Die dargestellte Unterteilung in drei Bereiche findet sich in Form mehrteiliger Konzepte auch bei bestehenden Verbundbremsscheiben wieder. Die Anbindung liegt hierbei separat vor oder sie ist dem Topfbereich beziehungsweise dem Reibringkörper (vgl. Verbundgussbremsscheibe Fa. Brembo, Kapitel 2.2.3.1, S. 13) zugeordnet. Bekannte Bauarten von Verbundbremsscheiben lassen sich auf Bauteilebene über die gezeigte Aufteilung der Minimalstruktur abbilden. Neben der geometrischen Ausgestaltung ergeben sich weitere Variationsmöglichkeiten durch die verwendeten Werkstoffe sowie die eingesetzte Fügetechnik.

### 5.2.3 Funktionsebene

Für die systematische Entwicklung neuer Lösungen kommen in der Produktentwicklung kombinatorische Methoden wie beispielsweise morphologische Kästen zum Einsatz. In diesen werden die Lösungen für die Teilfunktionen eines Bauteils oder einer Baugruppe mit dem Ziel dargestellt, durch Kombinatorik zu neuen Gesamtlösungen zu gelangen. Die Struktur eines morphologischen Kastens dient als Grundlage für die Darstellung der Lösungsmöglichkeiten der mechanischen Funktionsumfänge in Tabelle 5.4 und thermischen Funktionsumfänge in Tabelle 5.5. Die aufgeführten Teilfunktionen sind der Funktionsgliederung in Abbildung 5.2 entnommen. Zur weiteren Spezifikation werden den Teillösungen ihre potenziellen Merkmalsausprägungen, wie beispielsweise Werkstoff oder Geometrie, als weiterer Variationsfaktor zugeordnet. In vertikaler Richtung sind somit die Teilfunktionen aufgeführt, während in horizontaler Richtung Teillösungen sowie zugehörige Eigenschaftsmerkmale aufgeführt werden. Die Piktogramme neben der Beschreibung zeigen vereinfacht die Änderung. Lösungen, die zu einer Mehrteiligkeit der Brems scheibe führen, sind grau hinterlegt. Die aus der Verbindungstechnik resultierende Varianz wird in Kapitel 5.2.4 separat behandelt.

Für die Darstellung der **Verschleißfunktion** werden drei Lösungen abgeleitet. Bei bestehenden Serien-Brems scheiben liegt bedingt durch die Einteiligkeit des Reibringkörpers eine Integration der Verschleißfunktion vor. Weitere Lösungen erfordern demzufolge eine Auftrennung des Reibringkörpers, die in der zweiten und dritten Spalte in Form von Verschleißelementen und Beschichtungen dargestellt sind (vgl. Patentsituation in Anhang 13.1). Beide Teillösungen werden durch Eigenschaftsmerkmale beschrieben, die eine weitere Variation ermöglichen. In diesem Zusammenhang sind insbesondere die verwendeten Werkstoffe sowie die Geometrie in Form der Element- oder Schichtdicke zu nennen. Für die Gestaltung der Reib- und Verschleißzone ist die Verwendung eines für diese Funktionen bewährten Werkstoffs wie beispielsweise Grauguss denkbar. Ergänzend hierzu ergibt sich die Möglichkeit den Grundkörper sowie weitere Bereiche, wie die Anbindung oder den Topf, aus einem Leichtbauwerkstoff herzustellen, dessen Reib- und Verschleißigenschaften für den Einsatz in der Kontaktzone ungeeignet sind. Eine ähnliche Unterteilung im Reibringkörper wird in der Patentschrift von Habenicht<sup>174</sup> beschrieben, wobei auf einen metallischen Reibringkörper keramische Verschleißelemente aufgebracht werden. Bei separater Ausführung der Verschleißfunktion als Elemente oder Beschichtung sind Sekundäreffekte auf die thermische Funktion (Wärmespeicherung, Wärmeleitung) zu berücksichtigen.

---

<sup>174</sup> Habenicht, H.: Patentschrift DE 101 54 333 B4, 2001

Der **Bremsmomentaufbau** aktueller Brems scheibenbauarten zeichnet sich, auch bedingt durch das physikalische Wirkprinzip einer Reibungsbremse, durch ein einheitliches Funktionsprinzip aus. Die Spannkraftaufnahme erfolgt bisher über die gesamte Struktur des Reibringkörpers. Die dargestellte Alternative ist durch eine Reibringkörperteilung gekennzeichnet, bei der beide Reibringe über ein Gerüst, beispielsweise in Form eines Stabwerks, miteinander verbunden sind. Der Grundkörper befindet sich unter Annahme idealer Randbedingungen nicht mehr im Kraftfluss und kann einteilig, oder zweiteilig bei Integration eines Kühlkanals, aus einem anderen Werkstoff ausgeführt werden. Der Reibwertaufbau zwischen Bremsbelag und Brems scheibe erfolgt an der Reibringoberfläche und ist somit direkt an die Verschleißfunktion gekoppelt, was bei einer Auftrennung im Hinblick auf die Werkstoffauswahl zu berücksichtigen ist. Aus der Eigenschaftsanalyse geht der effektive Reibradius als Einflussgröße in die Höhe des realisierbaren Bremsmoments ein. Dieser hängt von der mechanischen und thermischen Gesamtdimensionierung der Brems scheibe sowie der Bauraumsituation ab und wird daher nicht als primär zu beeinflussendes Merkmal in Tabelle 5.4 berücksichtigt.

Die **Leitung des Bremsmoments** vom Kraftangriffspunkt bis zur Kontaktfläche Rad-Brems scheibentopf-Radlager erfolgt bei bekannten Serienkonzepten über die komplette Brems scheibe. Eine selektive Gestaltung des Leitpfades ist beispielsweise durch eine Auftrennung der Reibringkörperstruktur möglich wie sie im Zuge der Spannkraftaufnahme beschrieben wird.

Tabelle 5.4: Morphologischer Kasten der mechanischen Teilfunktionen einer Bremscheibe

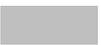
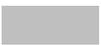
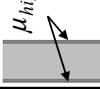
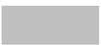
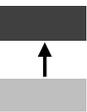
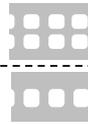
<b>Funktionsvarianten</b>					
<b>Teilfunktion</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>		
<b>Mechanische Funktion</b>	<b>Bremsmoment aufbauen/leiten</b>	<b>Verschleiß</b>	<p>In die Reibring-/den Reibringkörper integriert, keine konstruktive Trennung</p> 	<p>Mindestens ein separates Verschleißelement (VE) pro Reibring, konstruktive Trennung vom Grundkörper, lösbare Verbindung</p> 	<p>Ausführung als Beschichtung, nicht lösbare Verbindung</p> 
		<b>Spannkraft aufnehmen</b>	<p>Kraftaufnahme erfolgt über kompletten Reibringkörper</p> 	<p>Werkstoff, Anzahl pro Reibring, Abmessungen (Bogenlänge, Dicke)</p> <p>Kraftaufnahme beispielsweise über Gerüst, Grundkörper ist nicht im Kraftfluss</p> 	<p>Beschichtungszusammensetzung ist abhängig von Funktionsziel (Korrosion, Verschleiß etc.), Schichtdicke</p> <p>---</p>
		<b>Reibwert</b>	<p>Reibwert entsprechend Grundwerkstoff</p> 	<p>Werkstoffe, Auslegung Tragstruktur, Kühlkanalintegration</p> <p>Werkstoffänderung der Reibringoberfläche (z.B. Oberflächenbeschichtung)</p> 	<p>---</p>
<b>Bremsmoment leiten</b>	<p>Bremsmomentleitung erfolgt über kompletten Reibringkörper</p> 	<p>Bremsmomentleitung erfolgt selektiv über definierte Teilkomponenten</p> 	<p>---</p>	<p>Keine unabhängige Variation durch Kopplung an Verschleißfunktion</p>	
	<p>---</p>	<p>Definition Kraftleitpfad / Auslegung, Werkstoffe</p>	<p>---</p>	<p>---</p>	

Tabelle 5.5: Morphologischer Kasten der thermischen Teilfunktionen einer Bremsscheibe

Funktionsvarianten					
Teilfunktion	1		2		3
Thermische Funktion	Wärmespeicherung	Werkstoffänderung		Geometrieänderung durch Anpassung des Bauteilvolumens	---
		Werkstoff		Anpassung Breite / Radius (Reibpfadhöhe) unter Beachtung des Bauraums	---
Wärmeübertragung	Konvektion	Geometrieanpassung – Vergrößerung der mit der Umgebungsluft in Kontakt stehenden Flächen		Oberflächenvergrößerung durch Integration mindestens eines Kühlkanals in den Grundkörper	Oberflächenvergrößerung durch außenliegende Kühlkanäle
		Anpassung gemäß Teilfunktion Wärmespeicherung (2), Anpassung Mantelfläche (vgl. Piktogramm)		Abmessungen Kühlkanal, Geometrie / Anzahl Stege, Zwischenelemente (Werkstoff, Abmessungen)	Abmessungen Kühlkanäle, Geometrie / Anzahl Stege
	Strahlung	Geometrieanpassung – Vergrößerung der in den Raum abstrahlenden Flächen		---	---
		Anpassung gemäß Teilfunktion Wärmespeicherung (2), Anpassung Mantelfläche (vgl. Piktogramm)		---	---
Leitung	Werkstoffänderung		Geometrieanpassung über Variation des Wärmeleitungsquerschnitts (z.B. im Anbindungsbereich)	---	
		Werkstoff		Geometrie	---

Die thermischen Funktionsumfänge von Brems scheiben sind durch die eingesetzten Werkstoffe sowie die geometrische Gestaltung beeinflussbar. Für die Festlegung der **Wärmekapazität** sind hinsichtlich der eingesetzten Werkstoffe die spezifische Wärmekapazität und Dichte von Bedeutung, wobei die Geometrie in Form des Bauteilvolumens zu berücksichtigen ist. Variationsmöglichkeiten resultieren somit aus einer Geometrieänderung oder einer Werkstoffänderung, die auch lokal begrenzt in einzelnen Komponenten eingesetzt werden kann.

Ein wesentlicher Variationsparameter der Wärmeübertragungsmechanismen **Konvektion** und **Strahlung** bildet die Fläche. Im Hinblick auf die wirksamen Flächen ist zwischen Konvektion und Strahlung zu differenzieren. Für den konvektiven Wärmeübergang sind alle mit der Umgebungsluft in Kontakt stehenden Flächen einer Brems scheibe relevant, wohingegen für die Strahlung als zusätzliche Anforderung eine Abstrahlung in den freien Raum zur Vermeidung einer Reflexion zu berücksichtigen ist. Neben einer Radienerhöhung oder einer Aufdickung des Reibringkörpers zeigt Spalte 1 eine Lösung zur Erhöhung von Konvektion und Strahlung durch Vergrößerung der Mantelflächen des Reibringkörpers. Eine bereits bekannte Lösung zur Vergrößerung der Flächen für den konvektiven Wärmetransport stellt die Integration eines Kühlkanals dar (Spalte 2). Die Ausprägung der Rippenanzahl und Rippengeometrie ermöglicht eine weitere Beeinflussung der wirksamen Fläche. Bereits in Serie befindliche Brems scheiben verfügen beispielsweise über eine unterbrochene Steggeometrie im Kühlkanal, wodurch die Fläche im Kühlkanal vergrößert wird. Bei Änderungen der Kühlkanalgeometrie sind mögliche daraus resultierende negative Strömungsbeeinflussungen zu berücksichtigen, die bei Erhöhung der Fläche zu einem gegenläufigen Verhalten in Bezug auf die Wärmeübertragung führen können. Eine weitere Variante stellt die Erhöhung der Kühlkanalzahl dar, die beispielsweise urformend oder über Zwischenelemente realisiert werden kann. In DE 10 2005 033 352 A1<sup>175</sup> wird eine entsprechende Lösung vorgeschlagen, die ein Blech in der Mitte des Kühlkanals vorsieht. Inwieweit dadurch eine positive Beeinflussung thermischer Merkmalsausprägungen wie Spitzentemperatur und Abkühlzeit erfolgt, ist zu untersuchen. Hinsichtlich des Leichtbauziels ist zu prüfen, ob durch die genannten Kühlkanalanpassungen eine Reduzierung der Wärmekapazität und damit der Bauteilmasse realisierbar ist. Als weitere Lösung ist eine Invertierung der Kühlkanalgeometrie an den Reibflächen nach dem Prinzip der geometrischen Umkehrung<sup>176</sup> zu nennen, die aufgrund einer abnehmenden Reibfläche Nachteile in Bezug auf lokale Temperaturspitzen, Bremskomfort (Rubbeln) und Verschleiß erwarten lässt.

---

<sup>175</sup> Kraft, K.; Körner, M.; Repmann, C.: Offenlegungsschrift DE 10 2005 033 352 A1, 2005

<sup>176</sup> Vgl. Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte, 2008, S. 373

Baumgartner<sup>177</sup> et al. stellen in ihrer Patentschrift eine entsprechende Brems scheibe mit verschiedenen potenziellen Kühlkanalgeometrien dar.

Die Beeinflussung der Teilfunktion **Wärmeleitung** ist werkstoffseitig über die Wärmeleitfähigkeit möglich oder über eine geometrische Anpassung des Wärmeleitwiderstandes. Aus dem Ansatz einer gleichmäßigen Werkstoffausnutzung sowie einer möglichen Reduzierung der Reibringkörpertemperatur wird eine Erhöhung der Querschnittsflächen im Anbindungsbereich zwischen Reibringkörper und Brems scheibentopf abgeleitet (Wärmeleitung – Spalte 2). Darüber hinaus ist eine Reduzierung der Wärmeleitung zum thermischen Schutz von Teilbereichen wie dem Brems scheibentopf denkbar. Die Parameter zur Beeinflussung der Wärmeleitung stellen somit ein Werkzeug zur Steuerung des Wärmetransports innerhalb der Brems scheibe dar und ermöglichen damit weitere Gestaltungsoptionen.

### 5.2.4 Verbindungsebene

Die dargestellte Minimalstruktur, die die Komponentenebene berücksichtigt, sowie der auf Funktionsbasis erstellte morphologische Kasten ermöglichen die Ableitung von Brems scheibenkonzepten in mehrteiliger Ausführung. Die Ausgestaltung der Verbindung einzelner Brems scheibenkomponenten beeinflusst Funktion sowie Fertigungsaufwand (vgl. Kapitel 2.2.3 und Kapitel 2.3) der Brems scheiben. Die Auswahl lösungsbeeinflussender Parameter für die Verbindungsgestaltung erfolgt unter Berücksichtigung der von Ponn<sup>178</sup> und Lindemann beschriebenen Checkliste der Gestaltparameter. Neben den eingesetzten Werkstoffen werden die Gestaltmerkmale, die im Zusammenhang mit Fertigungs- und Fügeverfahren stehen, als Variationsparameter abgeleitet. Insbesondere die Charakterisierung der Wirkflächen sowie die Verbindungseigenschaften, die durch Schlussart, Lösbarkeit und Beweglichkeit beschrieben werden, sind von Bedeutung. In Tabelle 5.6 sind zusammenfassend die gewählten Kategorien sowie Gestaltmerkmale aufgeführt, wobei die Darstellung nicht als hierarchische Gliederung zu verstehen ist. Die Gestaltmerkmale werden nachfolgend beschrieben und vor dem Hintergrund des Einflusses auf die Realisierung einer mehrteiligen Brems scheibe diskutiert.

Das Gestaltmerkmal **Werkstoff** beeinflusst neben Funktion und Masse einer Brems scheibe auch den Fertigungsprozess und ist somit im Sinne einer fertigungsgerechten Gestaltung zu berücksichtigen. Die in Kapitel 5.1.2 (Abbildung 5.3) dargestellte Systematik von Werkstoffen zeigt weitere Unterteilungsmöglichkeiten.

---

<sup>177</sup> Baumgartner, J.; Pahle, W.; Iraschko, J.: Europäische Patentschrift EP 1 859 178 B1, 2011

<sup>178</sup> Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte, 2008, S. 358 ff.

Tabelle 5.6: Variationsmöglichkeiten auf Fertigungs- und Verbindungsebene

	Produktionsbezogene Eigenschaften		
<b>Werkstoff</b>	Werkstoffeinteilung auf Basis der Werkstoffsystematik		
<b>Fertigungs- verfahren</b>	Fertigungsverfahren der Einzelkomponenten aufbauend auf DIN 8580		
<b>Fügeverfahren</b>	Fügeverfahren aufbauend auf DIN 8593		
	Wirkflächen		
<b>Allgemeine Ausprägung</b>	Integriert in Komponentengeometrie	Separate Verbindungselemente	
	Kombination aus integrierten und separaten Verbindungselementen		
<b>Form</b>	Geometrische Gestaltung der Wirkflächen / Wirkelemente		
<b>Lage &amp; Kontakt</b>	Lage der Wirkflächen zueinander, Punkt-/Linien- oder Flächenkontakt		
<b>Zahl</b>	Anzahl der Wirkflächen / Wirkelemente		
<b>Größe</b>	Größe der Wirkflächen in Summe		
	Verbindungseigenschaften		
<b>Schlussart</b>	Stoffschluss	Formschluss	Kraftschluss
	Kombinierter Schluss		
<b>Lösbarkeit</b>	Lösbar	Nicht lösbar	
<b>Beweglichkeit</b>	Elastisch	Starr	Mit Freiheitsgrad
			Rotatorisch (gelenkig)

Die Realisierung mehrteiliger Verbundbrems scheiben ist neben dem Einsatz verschiedener Werkstoffe zunächst durch einen separaten **Fertigungs**prozess der Einzelkomponenten gekennzeichnet. Die Verbindung erfolgt über **Fügeverfahren** wie im vorangegangenen Abschnitt dargestellt. Für die Auswahl des Fügeverfahrens ist die Gestaltung der Verbindungszone von Bedeutung. Diese ist durch die **Wirkflächen** sowie weitere **Verbindungseigenschaften** gekennzeichnet. Die Wirkflächen charakterisieren den Kontaktbereich zwischen den zu verbindenden Komponenten, wobei zunächst die allgemeine Ausprägung zu unterscheiden ist. Verfügen die zu verbindenden Bauteile bereits über die erforderlichen Wirkflächen, so liegt eine Integration vor. Beispiel für ein entsprechendes Konzept ist die über zwei Gießprozesse hergestellte Verbundbrems scheibe (vgl. Kapitel 2.2.3.1) der Fa. Brembo, bei der die Fügeverbindung bereits in den Fertigungsprozess integriert ist. Im Gießprozess des Topfes werden die als Wirkflächen dienenden Zapfen des Reibringkörpers umgossen, wodurch eine formschlüssige Verbindung entsteht. Vorteil dieser Ausprägung ist die Einsparung von Fertigungsschritten und damit eine potenzielle Aufwandsreduzierung. Der zweite Ansatz umfasst Verbindungen mittels separater Verbindungselemente wie bei Stift-, Niet- oder Schraubverbindungen. Des Weiteren ist eine Kombination beider Ansätze möglich. Die geometrische Gestaltung wird über die weiteren Gestaltmerkmale Form, Lage und Kontakt, Zahl sowie die erforderliche Größe der Wirkflächen definiert. In die Größe der Wirkflächen fließen

mechanische und thermische Funktionsanforderungen wie die Übertragung des Bremsmoments oder die Wärmeleitung ein. Als Lösungsbeispiel ist in diesem Zusammenhang eine Bremsscheibe mit konventionellem Grauguss-Reibringkörper und einem Topf aus Kunststoff zur Erhöhung der Massenreduktion im Vergleich zu Aluminiumwerkstoffen zu nennen. Als Schutz vor thermischer Überbeanspruchung ist eine Reduzierung der Wärmeleitung in den Topf durch Verringerung der Querschnittsfläche im Anbindungsbereich, beispielsweise über eine Stiftverbindung, denkbar.

Weitere Gestaltungsmerkmale werden in den **Verbindungseigenschaften** zusammengefasst. Die Schlussarten werden entsprechend der Gliederung in Kapitel 5.1.2 (Abbildung 5.4) eingeteilt und beeinflussen die Auswahl der Fertigungs- und Fügeverfahren. Darüber hinaus ist die Eignung der Schlussart in Bezug auf den in der Verbindung auftretenden Lastfall zu prüfen. Eine Beeinflussung der Bremsscheibenfunktion ist über das Gestaltungsmerkmal Beweglichkeit möglich. Gleitende Ausführungen sind bereits aus der Verbindung von Topf und Reibringkörper bei Carbon-Keramik-Bremsscheiben bekannt (vgl. Kapitel 2.3). Über Gleitelemente wird das unterschiedliche thermische Ausdehnungsverhalten der Werkstoffe kompensiert. Eine weitere Möglichkeit zur Funktionsbeeinflussung bildet die Realisierung von Freiheitsgraden wie beispielsweise bei der Stift-Bremsscheibe umgesetzt (vgl. Kapitel 2.2.3.1). Der radiale Freiheitsgrad zwischen Topf und Reibringkörper ermöglicht eine vom Topf unabhängige thermische Ausdehnung des Reibringkörpers, was zu einer Reduktion der entstehenden Spannungen führt. Neben Schlussart und Beweglichkeit ist die Lösbarkeit der Verbindung als weiteres Merkmal vor dem Hintergrund des Recyclings und der Wiederverwendung der Materialien zu erwähnen.

### 5.3 Fazit

Ausgehend von lösungsbeeinflussenden Ordnungskriterien, zu denen neben Funktionen auch die eingesetzten Werkstoffe sowie fertigungsrelevante Kriterien zählen, wird eine Methodik abgeleitet, die eine Systematisierung auf drei Ebenen vorsieht. In den einzelnen Systematisierungsstufen werden die Komponenten-, Funktions- und Fertigungsebene berücksichtigt, deren Inhalte im Lösungsfindungsprozess kombiniert werden können.

Mit Blick auf das Entwicklungsziel Leichtbau eröffnet die Systematisierung verschiedene Ansätze zur Umsetzung von Bremsscheiben in Leichtbauweise. Auf Komponentenebene dient die bei aktuellen Verbundbremsscheiben bewährte Unterteilung zwischen Reibringkörper und Topf als Grundlage für weitere Konzeptideen. Als Analogie im Lösungsfindungsprozess können beispielsweise Welle-Nabe-Verbindungen als drehmomentübertragende Bauteile herangezogen werden. Zusammen mit den auf Funkti-

onsebene dargestellten Lösungen und den Variationsmöglichkeiten im Bereich der Fertigung sind weitere Lösungen darstellbar.

Weiterhin wird durch einen vereinfachten Fertigungsprozess Potenzial zur Aufwandsreduzierung und damit zur Kostensenkung gesehen. Diesbezüglich werden, ausgehend von der Trennung zwischen Reibringkörper und Topf, Vorteile durch Konzepte erwartet, die eine Integration von Fertigungs- und Fügeprozess ermöglichen. In diesem Zusammenhang ist das Potenzial umformender Fertigungsverfahren von Interesse, die bereits für die Topffertigung bestehender Leichtbau-Bremsscheiben in Verbundbauweise zum Einsatz kommen, allerdings bisher über zusätzliche Elemente mit dem Reibringkörper verbunden werden.

Die in diesem Kapitel entwickelte Systematik zeigt einen Ansatz zur systematischen Ableitung neuer Bremsscheibenkonzepte. Die dreiteilige Systematisierung ermöglicht hierbei eine den Entwicklungsschwerpunkten, wie beispielsweise Leichtbau oder Fertigung, angepasste Vorgehensweise. Im Hinblick auf die Konzeptauswahl werden die in Kapitel 4 beschriebenen Zusammenhänge zwischen konstruktiver Gestaltung und thermischen Funktionsumfängen anhand eines in dieser Arbeit aufgebauten und im folgenden Kapitel vorgestellten thermischen Simulationsmodells einer Bremsscheibe analysiert.

## **6 Simulative Analyse der thermischen Bremsscheibenfunktionen**

### **6.1 Thermisches Modell der Bremsscheibe**

Die im Kapitel 5.3 vorgestellten Konzeptideen basieren auf verschiedenen Ansätzen zur Erreichung der Ziele bezüglich Leichtbau und Fertigungsaufwand. Neben einer Reduzierung der Masse lassen die Anpassungen von Geometrie und Werkstoff ausgehend von der Eigenschaftsanalyse vor allem einen Einfluss auf die thermische Funktion erwarten. Zur Unterstützung der Konzeptfindung und -bewertung werden im zweiten Teil des vorliegenden Kapitels die Einflüsse werkstofftechnischer und geometrischer Parameteränderung auf die thermische Leistungsfähigkeit einer Bremsscheibe mit Hilfe eines Simulationsmodells untersucht. Ausgehend von der Konkretisierung der Zielsetzung und der Anforderungen an das Modell werden zunächst der Modellaufbau und die Modellfunktionen dargestellt. Die Eignung des Modells für die Einsatzzwecke im Rahmen dieser Arbeit wird anhand einer Modellprüfung nachgewiesen.

#### **6.1.1 Zielsetzung und Anforderungen**

Das primäre Entwicklungsziel besteht darin, ein Werkzeug zu entwickeln, welches die Bewertung des Einflusses geometrischer und werkstofftechnischer Eigenschaften auf die thermische Funktion von Bremsscheiben ermöglicht. Der Modellaufbau ist dabei so umzusetzen, dass durch eine geeignete Modellstruktur und Schnittstellen im Modell die Analyse bestehender sowie neuer Konzepte ermöglicht wird. Daraus resultiert zum einen die Forderung nach einer geometrischen Parametrierbarkeit, die die Abbildung verschiedener Bremsscheibendimensionen gewährleistet. Weiterhin ist im Hinblick auf die Bewertung der werkstofftechnischen Einflussgrößen die Zuweisung verschiedener Werkstoffe zu den Teilbereichen der Bremsscheibe erforderlich.

Neben den bauartspezifischen Größen sind weitere Eingangsgrößen erforderlich, die Fahrzeug und Bremsszenario berücksichtigen. Hierzu sind auf Fahrzeugseite die Gesamtmasse sowie die Bremskraftverteilung zu nennen. In der Praxis treten verschiedene Bremsszenarien auf, die über die von der Bremsscheibe aufgenommene Leistung differenziert werden können. Der Energieeintrag in die Bremsscheibe ist daher variabel zu gestalten.

Zur Bewertung der thermischen Funktion ist als Ausgangsgröße die Temperatur an verschiedenen Stellen der Bremsscheibe erforderlich. Neben der Temperaturverteilung in der Bremsscheibe wird eine Aussage über den Grad der thermischen Werkstoffausnutzung ermöglicht. Mit Kenntnis des Temperaturprofils in der Bremsscheibe ist eine Energieflussbetrachtung durchführbar, die Aussagen über die quantitative Aufteilung zwischen den verschiedenen Wärmeübergangsmechanismen Konvektion, Strahlung und Leitung in Abhängigkeit der Eingangsgrößen ermöglicht.

Die freie Parametrierbarkeit des Modells bietet die Möglichkeit von Parameterstudien zur Quantifizierung von Wechselwirkungen zwischen den Parametern und zur Identifikation der Haupteinflussparameter auf die thermische Funktion. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse fließen unterstützend in die Konzeptauswahl und spätere Konzeptuntersuchung ein.

### 6.1.2 Modellierungswerkzeug und Modellarchitektur

Aus der Literatur sind verschiedene Modellierungsansätze für thermische Bremsscheibenmodelle bekannt,<sup>179,180</sup> die auf numerischen oder auf analytischen Ansätzen basieren. Ein in der Praxis häufig zum Einsatz kommender numerischer Simulationsansatz basiert auf der Finite-Elemente-Methode (FEM). Die Vorteile dieses Ansatzes liegen darin, dass auch komplexe Geometrien hinsichtlich verschiedener physikalischer Eigenschaften bereits in einer frühen Entwicklungsphase bewertet und optimiert werden können.<sup>181</sup> Nachteilig sind die langen Rechenzeiten sowie die Notwendigkeit eines existierenden CAD-Modells des zu untersuchenden Bauteils.

Die Einsatzzwecke des zu entwickelnden Modells zielen auf die Unterstützung der Konzeptauswahl in einer frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses sowie allgemeine Parameterstudien. Daher werden die Anforderungen bezüglich des geometrischen Detaillierungsgrads im Vergleich zu FE-Analysen reduziert. Ausgehend von den Anforderungen wurde ein in MATLAB/Simulink umgesetzter analytischer Modellierungsansatz gewählt, um eine schnelle Modellanpassung hinsichtlich der variablen Parameter und kurze Rechenzeiten zu realisieren.

---

<sup>179</sup> Grieve, D., Barton, D.C., Crolla, A., Buckingham, J.B., Chapman, J.: Investigation of Light Weight Materials For Brake Rotor Applications, 1995

<sup>180</sup> Füller, K.-H.: Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen, 1998

<sup>181</sup> <http://www.smart-fem.de/fem.html>, abgerufen am 07.04.2012

### 6.1.2.1 Abstraktion der Bremsscheibengeometrie

Für die Modellbildung wird die Bremsscheibengeometrie gemäß Abbildung 6.1 zunächst vereinfacht und darauf aufbauend in Segmente zerlegt.

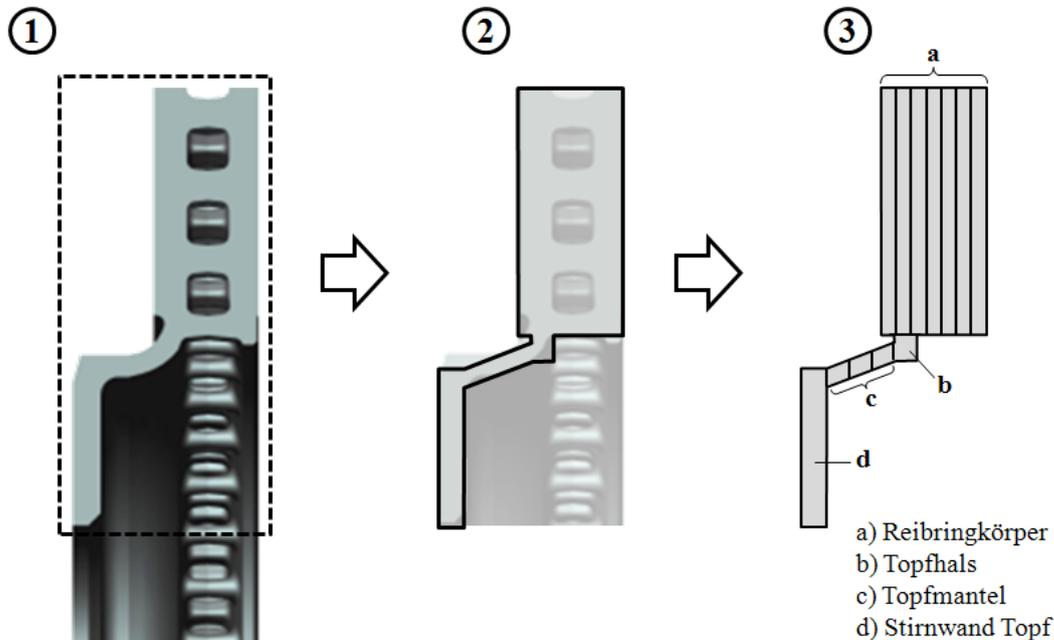


Abbildung 6.1: Bremsscheibengeometrie für die Modellbildung: Bremsscheibenschnittansicht (1), abstrahierte Bremsscheibengeometrie (2), diskretisierte Bremsscheibengeometrie (3)

Der Reibringkörper der Bremsscheibe wird in sieben Segmente zerlegt, wobei das mittlere Segment in Abhängigkeit der Bauart als Kühlkanal oder massiv ausgeführt ist. Die Geometrie der Kühlkanalrippen einer belüfteten Bremsscheibe wird als nicht gekrümmt angenommen. Über das Anbindungselement (b) erfolgt die Verbindung zwischen Reibringkörper und Topf der Bremsscheibe. Die Positionierung des Anbindungselementes ermöglicht sowohl die Simulation von außenbelüfteten als auch von innenbelüfteten Bremsscheiben. Der Topfbereich setzt sich aus vier Segmenten zusammen und wird im Modell über die Anlagefläche der Stirnwand (d) mit einem Felgenersatzstück verbunden, über welches die Wärmeleitung in die Felge berücksichtigt wird.

### 6.1.2.2 Physikalischer Modellaufbau

Für die physikalische Modellrealisierung und die Abbildung der thermodynamischen Prozesse wurde ein energieflussbasierter Ansatz gewählt. Ausgehend von dem durch den Bremsvorgang resultierenden Energieeintrag auf beiden Reibringseiten wird der Energiefluss von den Reibringoberflächen bis zum Felgenersatzstück im Modell abgebildet. Somit lässt sich entlang des Energieflusspfades das Temperaturprofil in der Bremsscheibe abbilden. Nachfolgend werden der Modellaufbau sowie die getroffenen Annahmen erläutert.

Aus der vorgenommenen Diskretisierung der Bremscheibe folgt die Annahme einer konstanten Temperatur innerhalb eines Segments. Der durch zu- und abgehende Energieflüsse resultierende Temperaturgradient innerhalb eines Segments wird damit vernachlässigt. In tangentialer Richtung wird über den Umfang eine gleichmäßige Wärmezufuhr in die Reibflächen angenommen. Während des Bremsvorgangs erfährt ein Punkt auf der Oberfläche der Bremscheibe durch Aufheiz- und Abkühlvorgänge eine periodische Temperaturänderung. Die Periode der Temperaturänderung ist im Vergleich zur gesamten Bremszeit sehr klein, weshalb ein Temperaturgradient in tangentialer Richtung vernachlässigt wird.<sup>182</sup>

Zur Berechnung der Temperaturverteilung werden Energieflussbilanzen zwischen den Teilsegmenten aufgestellt, in die die Wärmeübergangsmechanismen sowie die Wärmekapazitäten der Teilelemente einfließen. Als Bezugsgröße für die Berechnung wird für jedes Segment ein Referenzpunkt definiert, der sich in der Mitte des Segments befindet. In den Gitterpunkten werden Masse und Wärmekapazität des Segmentvolumens zusammengefasst. Über Wärmeleitwiderstände der Einzelsegmente erfolgt die Beschreibung der Wärmeleitung zwischen den Segmenten. Abbildung 6.2 zeigt den schematischen Modellaufbau am Beispiel von drei Reibringkörpersegmenten.

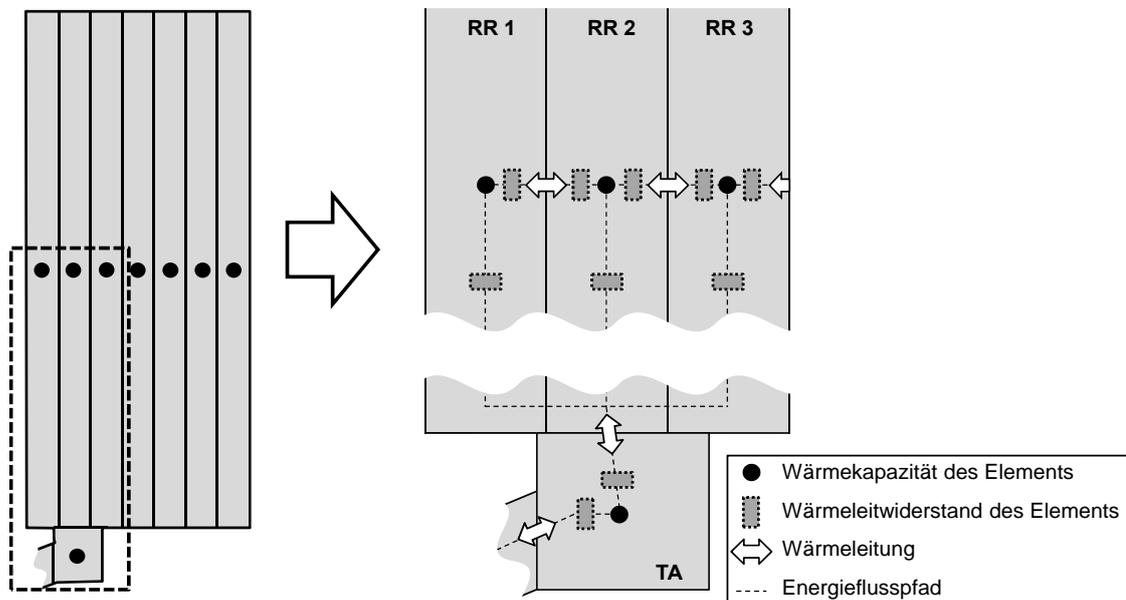


Abbildung 6.2: Diskretisiertes Modell mit Gitterpunkten und Energieflusspfad

Die Einbindung von Wärmestrahlung und Konvektion erfolgt im Modell auf Basis der in Kapitel 4.2.2.2 in den Gleichungen (4.13) bis (4.15) dargestellten Zusammenhänge. Detaillierte Ausführungen zu der Implementierung der Wärmeübergangsmechanismen

<sup>182</sup> Juettner, R.: Berechnung der thermischen Belastung einer Bremscheibe mit der Finite-Elemente-Methode, 1988, N3

im Modell sowie den getroffenen Annahmen sind in Anhang 13.4 dokumentiert. Die Berechnung der Energiestrombilanz erfolgt aufbauend auf den Wärmeübergangsmechanismen und ist exemplarisch für das Reibringsegment 1 (RR 1) in den Gleichungen (6.1) und (6.2) dargestellt.

$$\frac{d}{dT} E_{BS}(t) = \frac{d}{dt} Q_{BS}(t) = m_i c_i \frac{dT}{dt} = C \frac{dT}{dt} \quad (6.1)$$

$$m_{RR\_1} c_{RR\_1} \frac{dT_{RR\_1}}{dt} E_{bs}(t) = \frac{1}{2} \cdot \dot{Q}_{RR\_zu\_Brem} - (\dot{Q}_{RR\_1\_ab\_Strahl} + \dot{Q}_{RR\_1\_ab\_Konv} + \dot{Q}_{Leit\_RR\_1 \rightarrow RR\_2}) \quad (6.2)$$

Für die Berechnung des Energieeintrags in die Bremsscheibe werden folgende Annahmen getroffen:

- Vernachlässigung der Fahrwiderstände und Reibungsverluste im Antriebsstrang. Die kinetische Energie des Fahrzeugs wird in den Radbremsen vollständig in Wärme gewandelt.
- 90 % der in Wärme gewandelten Energie werden der Bremsscheibe zugeführt, 10 % den Belägen ( $\gamma = 0,9$ ).<sup>183</sup>
- Statische Bremskraftverteilung  $K_i$  zwischen Vorderachse ( $i = VA$ ) und Hinterachse ( $i = HA$ ) während des gesamten Bremsvorgangs.
- Annahme einer konstanten Verzögerung  $D(t) = const.$  (mit  $D = (-a)$ )
- Beiden Reibringflächen wird die in Wärme gewandelte Energie zu gleichen Teilen zugeführt.

Aus der während einer Verzögerung  $D$  umgewandelten kinetischen Fahrzeugenergie  $E_{kin,Verz}$  (Gleichung (6.3)) und unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen wird der einer Vorderachs-Bremsscheibe zugeführte Wärmestrom  $\dot{Q}_{BS,zu}$  nach Gleichung (6.4) bestimmt.

$$E_{kin,Verz}(t) = \frac{1}{2} m_{Fzg} \cdot v_0^2 - \frac{1}{2} m_{Fzg} \cdot v_{Fzg.}(t)^2 \quad \text{mit} \quad v_{Fzg.}(t) = v_0 - Dt \quad (6.3)$$

$$\dot{Q}_{BS,zu}(t) = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot K_{VA} \cdot E_{kin,Verz}(t) \right) \quad (6.4)$$

### 6.1.3 Modellprüfung

Die Prüfung des Modells erfolgt anhand von Versuchsdaten einer einteiligen innenbelüfteten Vorderachs-Bremsscheibe (Dimension Ø360x34) eines Oberklassefahrzeugs, die

---

<sup>183</sup> Remfrey, J.; Gruber, S.; Ocvirk, N.: Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 100

an einem Schwungmassenprüfstand<sup>184</sup> aufgenommen worden sind. Der Hauptvorteil des Schwungmassenprüfstands liegt im Vergleich zu Fahrzeugversuchen in einer sehr guten Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen. Aufgrund eines konstanten Kühlluft-Volumenstroms bekannter Temperatur wird von gleichbleibenden Anströmverhältnissen während eines Versuchs ausgegangen. Die das Bremsszenario charakterisierenden Parameter wie Geschwindigkeit sowie Bremsmoment und Bremsdruck werden als Messdaten aufgezeichnet und bilden die Eingangsgrößen des Modells. Die für die Kühlung der Bremsscheibe relevanten Prüfstandsparameter Volumenstrom und Temperatur werden im Modell entsprechend übernommen.

Die Randbedingungen für die Versuche und die Kriterien zur Modellprüfung werden aus der Zielsetzung des Modells abgeleitet. Die Bewertung der thermischen Funktion einer Bremsscheibe wird allgemein über das aufgenommene Temperaturprofil beschrieben. Hierfür wird in den Versuchen die Temperatur an verschiedenen Positionen der Bremsscheibe über Thermoelemente erfasst. Die Messhardware des Prüfstands erlaubt die parallele Aufzeichnung von vier Temperatursignalen. Um das Temperaturprofil der Bremsscheibe zu erhalten, werden die Versuche mit Messungen an verschiedenen Positionen wiederholt. Das für die Validierungsversuche gewählte Prüfzenario ist durch zwei aufeinanderfolgende Verzögerungen ( $D = 8 \text{ m/s}^2$ ) von 225 km/h auf 20 km/h gekennzeichnet, so dass sowohl die auftretenden maximalen Temperaturen wie auch das Abkühlverhalten geprüft werden können.<sup>185</sup>

### 6.1.3.1 Maximaltemperatur in der Bremsscheibe

Die auftretenden Maximaltemperaturen sind eine Bewertungsgröße für den Grad der thermischen Werkstoffausnutzung in den einzelnen Bereichen der Bremsscheibe. Darüber hinaus können erste Aussagen über die Wärmeleitung innerhalb der Bremsscheibe in den ersten Sekunden einer Bremsung getroffen werden. Die richtige Wiedergabe der maximalen Temperaturen stellt somit eine wichtige Anforderung an das Modell dar. Phänomene wie Hotbanding oder eine durch Sattelaufweitung bedingte ungleichmäßige Flächenpressung der Bremsbeläge führen in der Praxis zu einer vor allem radial ungleichmäßigen Temperaturverteilung auf den Reibringoberflächen. Zur Berücksichtigung dieser Einflüsse sind die Reibringe radial in drei Zonen eingeteilt. In Abhängigkeit der Konfiguration werden die Temperaturen am Außen- und Innenradius sowie mittig auf beiden Reibringseiten aufgenommen. In Abbildung 6.3 sind die Positionen der Thermoelemente dargestellt. Insgesamt werden auf dem Außen- und Innenradius an jeweils zwei Positionen die Temperaturen aufgenommen, im mittleren Reibringbereich

---

<sup>184</sup> Leistungsdaten des eingesetzten Schwungmassenprüfstands: siehe Anhang 13.5.1, Tabelle 13.7

<sup>185</sup> Daten des Prüfzenarios, siehe Anhang 0, Tabelle 13.4

an vier Positionen. Weitere Messstellen befinden sich an zwei Stellen im Bereich des Übergangs in den Topf.

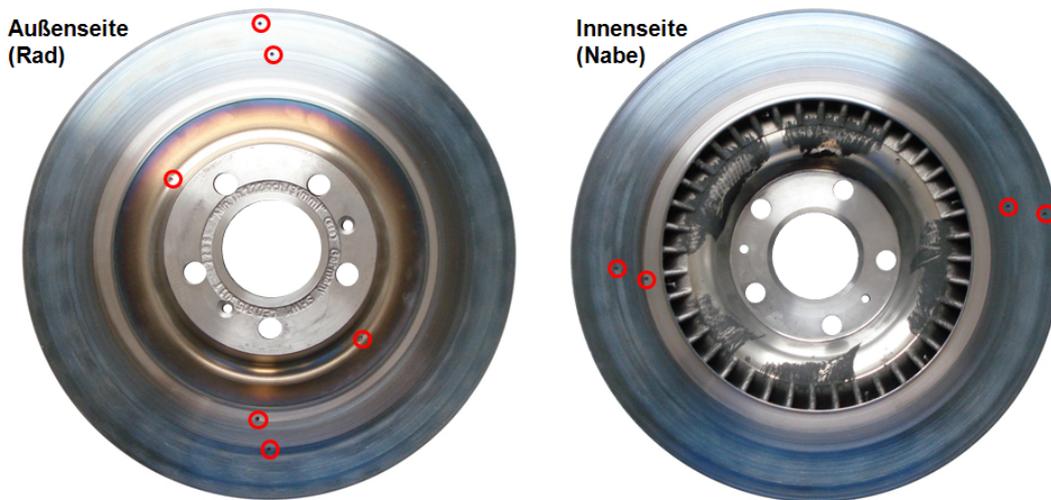


Abbildung 6.3: Positionen der Thermoelemente in der geprüften Bremsscheibe

In die Überprüfung fließen die Ergebnisse von 26 Messungen aus insgesamt acht Versuchen ein. Für die Prüfung der Maximaltemperatur werden nur die Ergebnisse der ersten Bremsung verwertet, da diese im Unterschied zum zweiten Stopp die gleiche Starttemperatur ( $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) aufweisen. Voraussetzung für den Vergleich der Ergebnisse aus den Temperaturmessungen der einzelnen Bremsungen ist ein gleicher Energieeintrag für die erste Bremsung. Ein Vergleich der Energieeinträge in Tabelle 6.1 zeigt für die erste Bremsung eine Standardabweichung  $\sigma = 1,49 \cdot 10^3 \text{ J}$  vom Mittelwert. Der Variationskoeffizient  $VarK$  ist mit einem Wert von 0,09 % sehr gering, womit die Reproduzierbarkeit als gegeben angenommen wird.

Tabelle 6.1: Zugeführte Energie in die Bremsscheibe

	<b>Zugeführte Energie der 1. Bremsung in J</b>
<b>Mittelwert</b>	$1,62 \cdot 10^6$
<b>Standardabweichung</b>	$1,49 \cdot 10^3$
<b>Variationskoeffizient</b>	0,09 %

Die Zusammenfassung aller Reibringtemperaturen der ersten Bremsung führt zu dem in Abbildung 6.4 gezeigten Temperaturband. In der angefügten Tabelle sind die Mittelwerte der Temperaturmessungen für jede Zone sowie gesamthaft dargestellt. Die im Temperaturbereich nach unten hin abweichenden Verläufe sind am Innenradius aufgenommen worden. Die starke Streuung der Ergebnisse verdeutlicht die ungleichmäßige Temperaturverteilung trotz eines gleichbleibenden Energieeintrags.

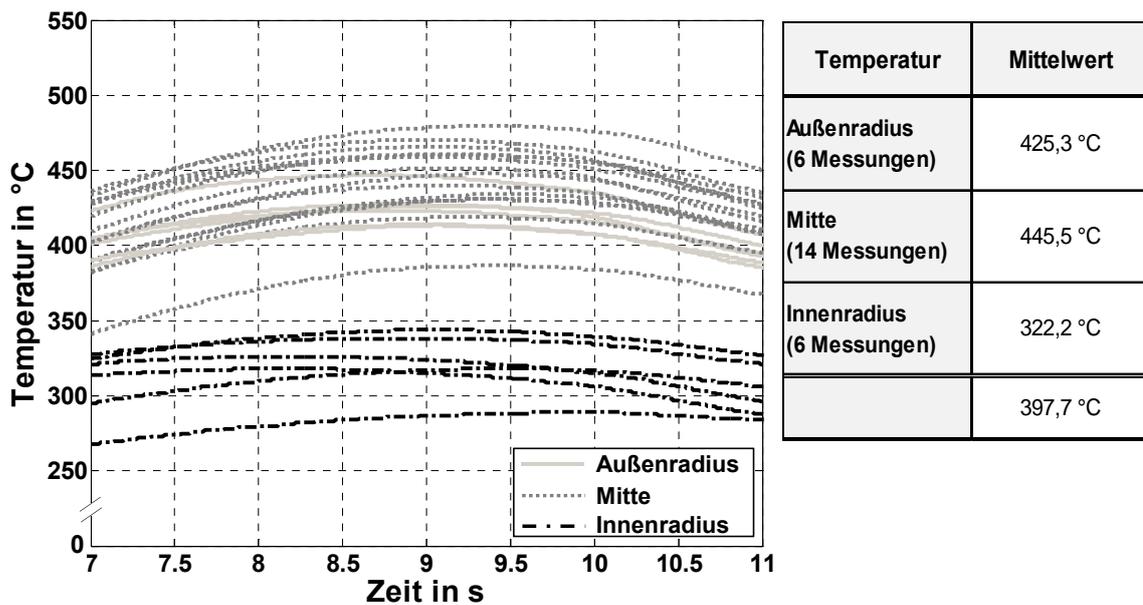


Abbildung 6.4: Maximaltemperaturen der ersten Bremsung an der Reibringoberfläche (alle Radien) über alle Versuche

Physikalisch können die Unterschiede der Oberflächentemperaturen durch eine entstehende Sattelaufweitung (vgl. Abbildung 6.5, links) beschrieben werden. Diese resultiert aus dem für die Verzögerung erforderlichen erhöhten Bremsdruck ( $p_{hydr.} \approx 80 \text{ bar}$ ), wodurch in der Folge eine ungleichmäßige Flächenpressung entstehen kann. Abbildung 6.5 (rechts) verdeutlicht dies beispielhaft anhand der Ergebnisse des spannungsoptischen Kugeldruckverfahrens.

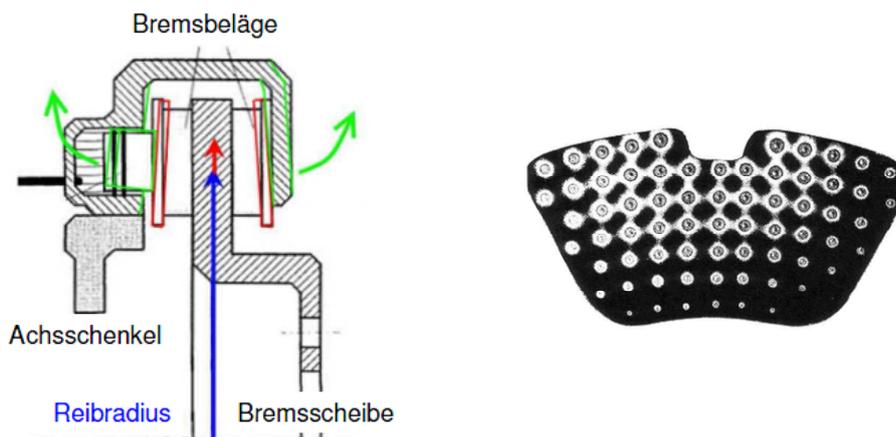


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der Sattelaufweitung (links)<sup>186</sup> und Druckverteilung am Belag als Ergebnis des spannungsoptischen Kugeldruckverfahrens (rechts)<sup>187</sup>

<sup>186</sup> Degenstein, T.: Kraftmessung in Scheibenbremsen, 2007, S. 21

<sup>187</sup> Burckhardt, M.: Fahrwerktechnik: Bremsdynamik und Pkw-Bremsanlagen, 1991, S. 208

Damit kann eine ungleichmäßige radiale Temperaturverteilung allgemein als Folge einer erhöhten Flächenpressung im mittleren und äußeren Radienbereich erklärt werden. Ein Einfluss von thermomechanischen Effekten durch sogenannte Hotspots oder Hotbands wird als unwahrscheinlich angesehen, da diese Phänomene vor allem bei geringen bis mittleren Verzögerungen aus hohen Geschwindigkeiten auftreten.<sup>188</sup> Dies führt in Summe zu der Schlussfolgerung, dass die über dem Reibring entstehenden Temperaturunterschiede auf eine ungleichmäßige Anpressdruckverteilung der Beläge zurückzuführen sind.

Für den Abgleich mit den Simulationsergebnissen werden die Reibringtemperaturen von Rad- und Nabenseite herangezogen. Der Vergleich zwischen den Versuchsdaten und den korrespondierenden Simulationsergebnissen zeigt eine Differenz der Mittelwerte von 8 °C bei einem Mittelwert der Simulationsergebnisse von 389,8 °C. Im Vergleich zu den Versuchsergebnissen zeigt sich eine erwartungsgemäß geringe Schwankung der Simulationsergebnisse, die auf einen bei allen Versuchen annähernd gleichen Energieeintrag und die idealisierte Annahme eines über die Flächen homogenen Energieeintritts in den Reibringkörper zurückzuführen ist. Tabelle 6.2 zeigt den Vergleich zwischen Versuchs- und Simulationsergebnissen für den Reibring sowie den Bereich des Topfhalses.

Tabelle 6.2: Vergleich von Versuchs- und Simulationsergebnissen bezogen auf die Oberflächen-temperatur des Reibrings sowie die Temperatur im Bereich der Anbindung

	Temperaturen in °C			
	Messung			Simulation
<b>Reibring</b>	<i>Außen</i>	425,3	397,7 (*)	389,8
	<i>Mitte</i>	445,5		
	<i>Innen</i>	322,2		
<b>Topfhals/ -mantel</b>	138,50			134,0

(\*) Mittelwert über alle drei Radien

Als Schlussfolgerung ist festzuhalten, dass mit Hilfe des Modells und unter der Einschränkung idealer Randbedingungen eine prinzipielle Aussage über die maximale thermische Belastung einer Bremsscheibe in Form der auftretenden Temperaturen möglich ist. Die Höhe der auftretenden Abweichungen zwischen Versuch und Simulation wird für die weitere Nutzung des Modells in dieser Arbeit als akzeptabel angesehen.

---

<sup>188</sup> Sardá, A. H.: Wirkungskette der Entstehung von Hotspots und Heißrubbeln in Pkw-Scheibenbremsen, 2009, S. 29

### 6.1.3.2 Abkühlverhalten

Für die Bewertung des Abkühlverhaltens wird aufgrund der längeren Abkühlphase die zweite Bremsung des Doppelstopps herangezogen, die im Folgenden zunächst charakterisiert wird. Im Temperaturverlauf der Reibringoberfläche (vgl. Abbildung 6.6, links) ist in den ersten 15 Sekunden unmittelbar nach Erreichen der Maximaltemperatur des Reibrings eine schnelle Temperaturabnahme zu beobachten. Der Vergleich mit dem Temperaturverlauf im Kühlkanal verdeutlicht die im beschriebenen Zeitraum erfolgende Temperaturangleichung durch Wärmeleitung, bis ein annähernd homogenes Temperaturprofil im Reibringkörper vorliegt. Der in der Folge stets unterhalb des Reibringniveaus liegende Temperaturverlauf im Kühlkanal lässt in diesem Bereich auf eine höhere Wärmeabfuhr schließen. Im Bereich der Topfanbindung ist der Wärmeleitwiderstand in den Topf aufgrund des geringen Querschnitts vergleichsweise hoch, was durch den Temperaturverlauf im Bereich der Topfanbindung und die große Differenz zur Reibringtemperatur ( $\Delta T \approx 400 \text{ °C}$ ) verdeutlicht wird (vgl. Abbildung 6.6, rechts).

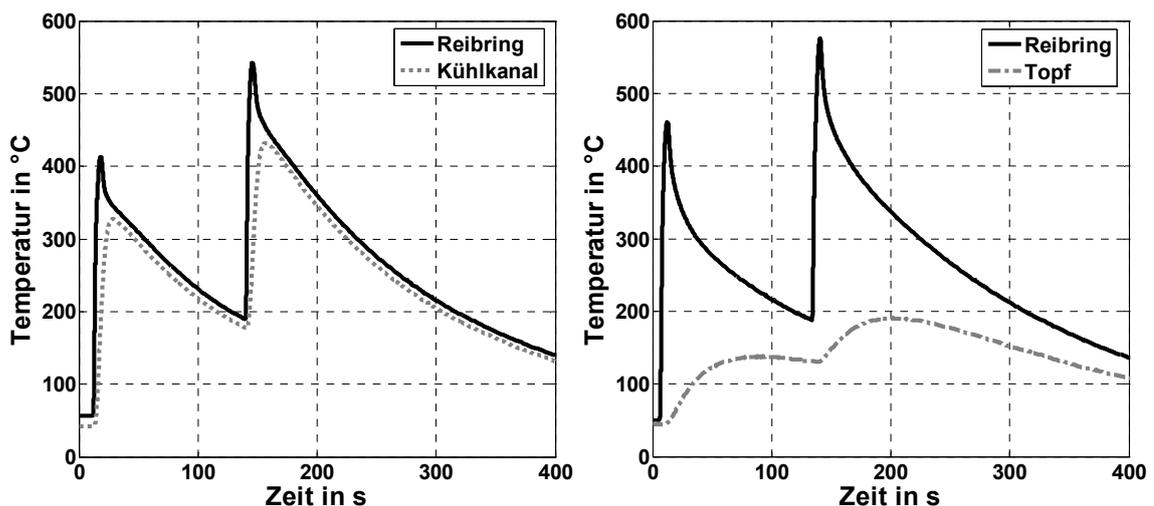


Abbildung 6.6: Vergleich der Temperaturverläufe bei einem Doppelstopp (unterschiedliche Versuche): Reibring- und Kühlkanaltemperatur (links), Reibring- und Topftemperatur (rechts)

Für den Abkühlvorgang einer Bremsscheibe ist die Konvektion der dominierende Wärmeübergangsmechanismus. Der Anteil wird in der Literatur für eine Bremsscheibe aus Grauguss mit 75 %<sup>189</sup> und für eine Carbon-Keramik-Bremsscheibe mit 84 %<sup>190</sup> angegeben. Der im Simulationsmodell errechnete Wert des konvektiven Wärmetransports liegt bei 80 % und damit im Bereich der Literaturwerte. Die Aufteilung der einzelnen Wärmeübergangsmechanismen in der Simulation für den kompletten Abkühlvorgang einer Stoppbremsung zeigt Abbildung 6.7.

<sup>189</sup> Schütz, T.: Ein Beitrag zur Berechnung der Bremsenkühlung an Kraftfahrzeugen, 2009, S. 14

<sup>190</sup> Güther, H.-M.; Wüllner, A.: Optimierung des Kühlkanal Designs von Carbon-Keramik-Bremsen, 2005, S. 28

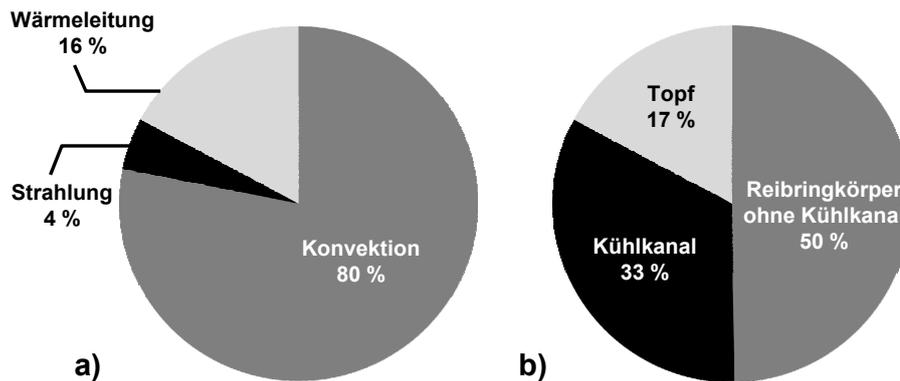


Abbildung 6.7: Anteile der einzelnen Wärmeübergangsmechanismen für einen simulierten Abkühlvorgang einer Bremsscheibe: a) Aufteilung der Wärmeübergangsmechanismen (Stoppbremsung); b) Aufteilung bezogen auf die wärmeabführenden Bremsscheibenbereiche

Die Systemgrenze für die Energiebilanz ist im vorliegenden Fall um den Reibringkörper gelegt. Der konvektive Wärmetransport wird vor allem durch den Kühlkanal begünstigt, über den im dargestellten Szenario ein Drittel der Energie abgeführt wird. Die Wärmeabgabe in den Topfbereich ist durch die vergleichsweise geringen Querschnitte in der Anbindung eingeschränkt und ist im Vergleich mit einem Anteil von 17 % von untergeordneter Bedeutung, was sich auch im Temperaturverlauf in Abbildung 6.6 (rechts) zeigt. Für die weitere Prüfung des Abkühlvorgangs wird daher nur der konvektive Wärmetransport berücksichtigt.

Der Abkühlvorgang lässt sich nach Newton durch eine Exponentialfunktion gemäß Gleichung (6.5) beschreiben. In der Abkühlkonstante  $\tau_{Abkühl}$  wird neben den Werkstoffeigenschaften der konvektive Wärmeübergang berücksichtigt.

$$T(t) = T_U + (T(t_0) - T_U) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{Abkühl}}} \quad \text{mit} \quad \tau_{Abkühl} = \frac{c \cdot m}{\alpha \cdot A} \quad (6.5)$$

Mit	$T(t_0)$ :	Ausgangstemperatur zum Zeitpunkt $t_0$ in K
	$T_U$ :	Umgebungstemperatur in K
	$\tau_{Abkühl}$ :	Abkühlkonstante in s
	$t$ :	Zeit in s
	$t_0$ :	Startzeitpunkt in s

Um vergleichbare Aussagen treffen zu können, werden die Abkühlkurven ab dem Zeitpunkt einer annähernd homogenen Temperaturverteilung im Reibringkörper ausgewertet. Dieser wird als Zeitpunkt  $t_0$  definiert, zu dem die Temperatur im Kühlkanal zu 95 % die Reibringtemperatur erreicht hat. Das Ende des Bewertungsintervalls  $t_1$  wird gesetzt, wenn die Reibringtemperatur 100 °C erreicht hat. Abbildung 6.8 zeigt den Vergleich der Abkühlkurven von Versuch und Simulation mit den jeweilig korrespondierenden Newton'schen Abkühlkurven für eine Bremsung. Die im Versuch aufgenommene Temperatur am Reibring ist im Maximum um etwa 45 °C höher als das Ergebnis der Simulation, was auf die im vorangegangenen Abschnitt 6.1.3.1 beschriebenen Effekte zurückzuführen

ren ist. Der Startpunkt der Abkühlkurven nach Newton wird durch das beschriebene 95 %-Kriterium definiert.

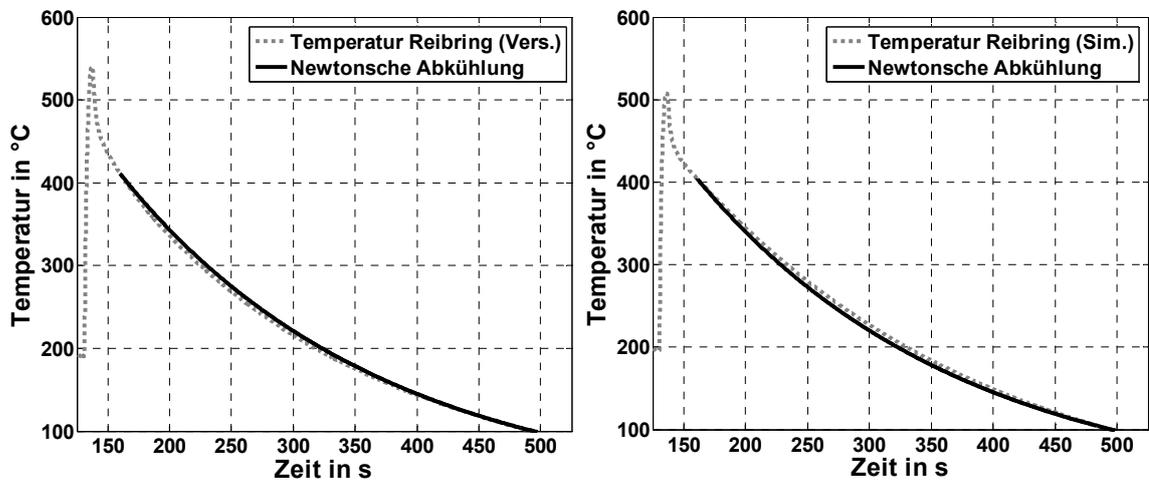


Abbildung 6.8: Vergleich der Temperaturverläufe des Reibrings von Versuch (links) und Simulation (rechts) für die zweite Bremsung eines Doppelstopps mit den korrespondierenden Newton'schen Abkühlkurven

Der Vergleich deutet auf einen hohen Übereinstimmungsgrad der Newton'schen Abkühlkurven mit den gemessenen und simulierten Temperaturverläufen hin. Für die weitere Bewertung der Übereinstimmung von Versuch und Simulation werden die Abkühlraten für beide Verläufe bestimmt. Abbildung 6.9 zeigt die Abkühlraten für Versuch und Simulation aus den Temperaturverläufen (links) sowie den Newton'schen Abkühlkurven (rechts) im beschriebenen Bewertungsintervall.

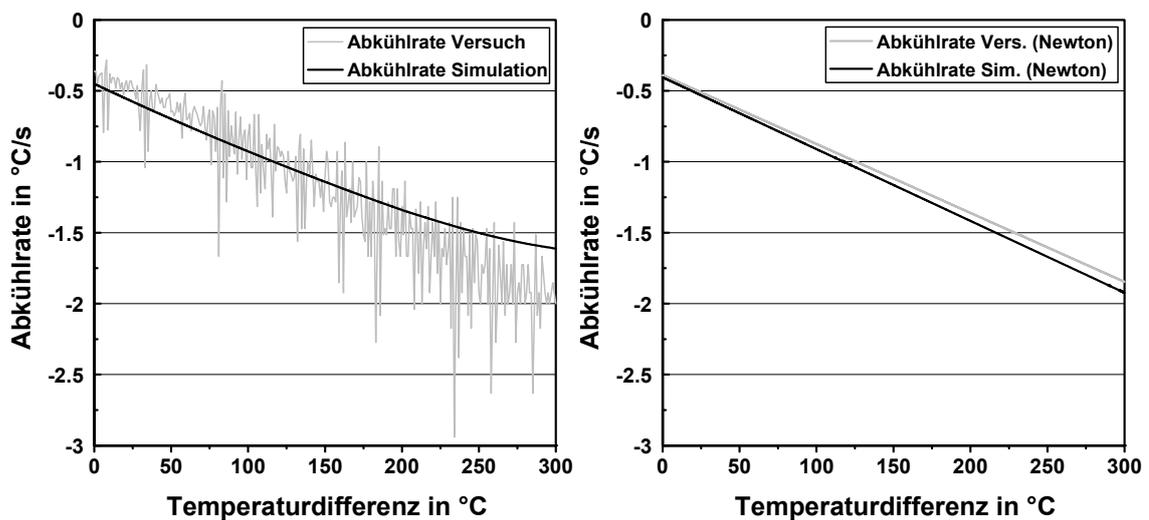


Abbildung 6.9: Abkühlraten von Versuch und Simulation (links), Abkühlraten aus den Newton'schen Abkühlkurven von Versuch und Simulation (rechts)

Die Abkühlraten aus Versuch und Simulation in Abbildung 6.9 (links) zeigen mit abnehmender Temperaturdifferenz einen zunehmenden Übereinstimmungsgrad. Bei einer Temperaturdifferenz über 200 °C zeigt die Abkühlrate der Simulation einen stärker

degressiven Verlauf als die Abkühlrate der Versuchswerte. Der steilere Temperaturverlauf der Versuchswerte geht auch aus Abbildung 6.8 hervor und ist unter anderem auf das höhere Temperaturniveau zu Beginn zurückzuführen sowie einen potenziell stärkeren Einfluss der Wärmestrahlung. Die sehr gute Abbildung der Konvektion zeigt der Vergleich der Abkühlraten der Newton'schen Abkühlkurven in Abbildung 6.9 (rechts) mit einer maximalen Abweichung unter 5 %. In Verbindung mit geringen Abweichungen der Abkühlzeit im Bewertungszeitraum ( $\Delta t \approx 2$  s) wird die Genauigkeit des Modells für die weiteren Untersuchungszwecke im Rahmen dieser Arbeit als ausreichend angesehen.

### 6.1.4 Fazit

Ausgehend von den zu Beginn formulierten Anforderungen wird ein vereinfachtes thermisch-analytisches Modell einer Bremsscheibe aufgebaut, welches die Abschätzung der thermischen Leistungsfähigkeit einer Bremsscheibe auf Basis von Maximaltemperatur und Abkühlzeiten ermöglicht. Unter der idealen Annahme eines gleichmäßigen Energieeintrags liegen die simulierten maximalen Reibringtemperaturen innerhalb der ermittelten Standardabweichung der Versuche. Die zu Beginn der Bremsung real auftretende ungleichmäßige Temperaturverteilung auf der Reibringoberfläche ist im Modell nicht dargestellt. Als Ursache der ungleichmäßigen Temperaturverteilung wird eine erhöhte Sattelaufweitung vermutet. Somit ist zu berücksichtigen, dass in der Praxis lokal deutlich höhere Temperaturen auftreten können als die im Modell errechnete mittlere Temperatur.

Für die Bewertung des Abkühlverhaltens werden die Abkühlkurven von Versuch und Simulation ausgewertet. Basierend auf dem Newton'schen Abkühltheorem erfolgt eine vereinfachte Betrachtung, in der die Konvektion als dominanter Wärmeübergangsmechanismus einfließt. Die Auswertung der Newton'schen Abkühlkurven ab dem Zeitpunkt einer annähernd homogenen Temperaturverteilung im Reibringkörper zeigt in den Abkühlraten eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation mit einer maximalen Abweichung unter 5 %. Durch die Möglichkeit zu jedem Zeitpunkt die Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  für die Einzelflächen abzuschätzen, wird die Berücksichtigung des konvektiven Wärmetransports ohne zusätzliche Strömungsberechnungen ermöglicht. Damit bietet das Modell auch Potenzial für weiterführende Detailuntersuchungen als Schnittstelle im Rahmen von Finite-Elemente-Analysen.

Die Parametrierbarkeit des Modells gewährleistet die Variation geometrischer und werkstofftechnischer Parameter, die im Rahmen der Eigenschaftsanalyse als Einflussgrößen auf die thermische Leistungsfähigkeit ermittelt worden sind. Die Bewertung der Parametereinflüsse auf die Spitzentemperaturen und das Abkühlverhalten einer Bremsscheibe stellt eine Bewertungsgrundlage für die aus der Systematik abgeleiteten Konzeptideen dar und wird im nachfolgenden Abschnitt diskutiert.

## 6.2 Parameteranalyse – Ergebnisse der thermischen Simulation

Das Ziel der Analyse ist die Bewertung der Einflüsse werkstofftechnischer und geometrischer Parameteränderungen auf die thermische Leistungsfähigkeit, um Rückschlüsse auf die funktionale Auslegung zu ziehen und den Auswahlprozess der Bremsscheibenkonzepte zu unterstützen. Die Parametervariation erfolgt auf Basis des entwickelten thermischen Simulationsmodells. Als Bewertungsgrößen werden die Spitzentemperatur als Indikator für den Grad der lokalen Werkstoffausnutzung sowie die Temperaturverteilung in der Bremsscheibe für den Grad der globalen Werkstoffausnutzung in der gesamten Bremsscheibe herangezogen. Die Fähigkeit, Wärme an die Umgebung abzugeben, wird über die Abkühlzeit bewertet. Ausgehend von einer homogenen Temperaturverteilung von 500 °C in der Bremsscheibe beschreibt die Abkühlzeit den Zeitraum bis zum Erreichen einer Zieltemperatur von 100 °C bei einer konstanten Geschwindigkeit von 120 km/h. Für die Analyse werden die Temperaturen im Reibring (Nabenseite), im Kühlkanal sowie in der Anbindung ausgewertet. Tabelle 6.3 zeigt die Übersicht der Variationsparameter mit den spezifischen Randbedingungen, in der auch Konzeptideen aus Kapitel 5 berücksichtigt sind.

Tabelle 6.3: Zielsetzung und Randbedingungen für die Parametervariation

	Variationsparameter	Inhalt / Zielsetzung	Randbedingungen
Werkstoff	<i>Spez. Wärmekapazität</i>	Einfluss auf maximale Temperatur und Temperaturverteilung in der Bremsscheibe	- feste Bremsscheiben- geometrie
	<i>Wärmeleitfähigkeit</i>		
Geometrie	<i>Reibpfadhöhe / Breite Reibringgrundkörper</i>	Vergleich der Ansätze bei Erhöhung der Wärmekapazität	- gleiche Wärmekapazität - konstante Kühlkanalweite
	<i>Querschnittsfläche Topfanbindung</i>	Potenzial des Topfes als wirksame Wärmekapazität	- Variation des Wärmewiderstands der Anbindung
	<i>Wärmeübergangskoeffizient</i>	Potenzial eines gesteigerten konvektiven Wärmeübergangs, z.B. durch bessere Durchströmung des Kühlkanals	- Variation des Wärmeübergangskoeffizienten

Die Einflüsse der Variationsparameter werden jeweils für verschiedene Bremsszenarien diskutiert. Aufgrund unterschiedlicher Lastkollektive bezogen auf den Energieeintrag pro Zeit, sind unterschiedlich starke Einflüsse einzelner Parameter zu erwarten. Prinzipiell werden zwei Szenarien unterschieden:

- *Stoppbremsung(en) (Autobahn)*: Verzögern aus hoher Geschwindigkeit; einmaliges Verzögern oder als wiederholtes Verzögern mit zwischenzeitlichen Beschleunigungsphasen (hoher Energieeintrag in kurzer Zeit)
- *Haltebremsung (Passabfahrt)*: Fahrt mit kontinuierlichem Bremsengriff, um Geschwindigkeit zu halten bzw. zu verringern (hoher Energieeintrag über langen Zeitraum)

Im Modell werden die Szenarien als Stoppbremsung bzw. Schleppbremsung mit konstant wirkendem Bremsmoment abgebildet. Der Energieeintrag für die Haltebremsung entspricht der in einer Bremsscheibe umgesetzten Energie bei einer Großglockner-Passabfahrt.<sup>191</sup> In der Auswertung wird im Gegensatz zur Stoppbremsung nur der Zeitraum der Energiezufuhr betrachtet. Für die Simulation wird die Bremsscheibe eines Mittelklassefahrzeugs mit der Dimension Ø320x30 gewählt, die später auch als Basis für die entwickelten Prototypen dient.

### 6.2.1 Temperaturverteilung in der Bremsscheibe bei Variation von Werkstoff und Geometrie

Im Rahmen der Variation der Werkstoffparameter werden die Wärmeleitfähigkeit sowie die spezifische Wärmekapazität berücksichtigt. Für die Definition des zu variierenden Wertebereichs werden die Werte aktueller Bremsenwerkstoffe herangezogen. Die Referenz (100 %) bilden die Parameter für Grauguss. Davon ausgehend erfolgt die Variation in einer Abstufung von 50 %, 150 % sowie 300 %, womit die Bereiche aktueller Bremsenwerkstoffe abgedeckt werden (vgl. Abbildung 6.10). Diese gewählte Abstufung wird analog auf die Geometrieparameter übertragen. Entsprechende Abweichungen oder Ergänzungen werden an gegebener Stelle im Kapitel erläutert. In den nachfolgenden Ausführungen werden nur die 50 %- und 150 %-Werte berücksichtigt. Eine erweiterte Darstellung der Ergebnisse befindet sich in Anhang 13.4.4.

---

<sup>191</sup> Randbedingungen für Großglockner-Passabfahrt, siehe Anhang 13.4.3, Tabelle 13.6

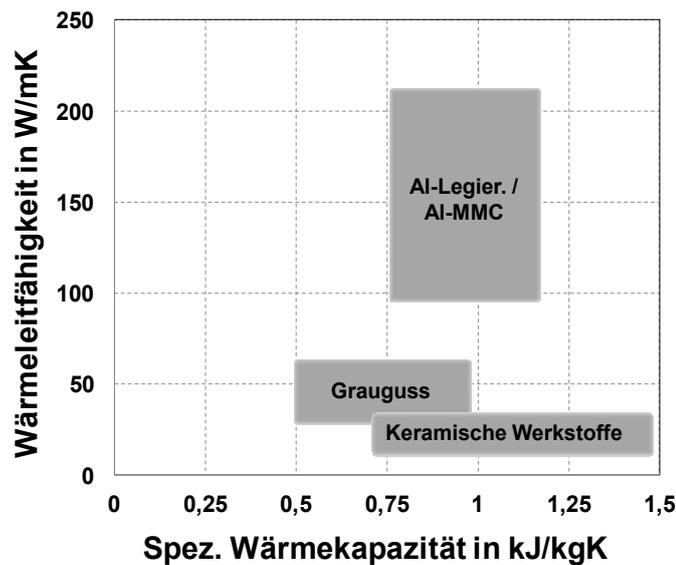


Abbildung 6.10: Variationsbereich von Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität<sup>192</sup>

### 6.2.1.1 Stoppbremsung<sup>193</sup>

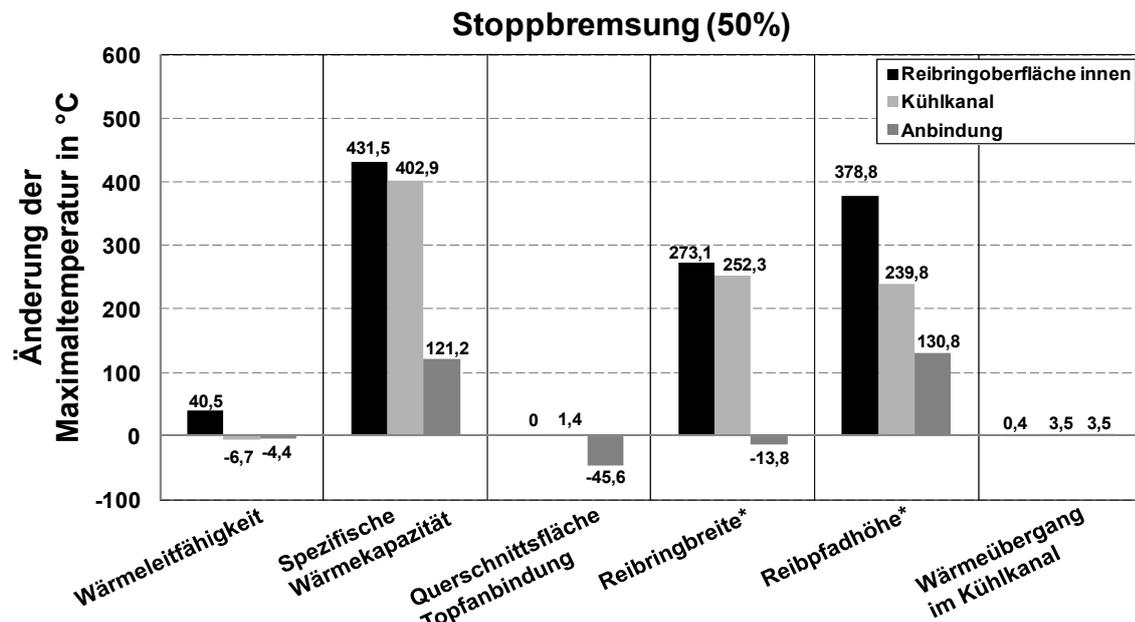
In Abbildung 6.11 sind die Änderungen der Maximaltemperatur bei einer Stoppbremsung für eine Senkung der definierten Variationsparameter auf 50 % der Referenzwerte der Basis-Bremsscheibe dargestellt. In die Betrachtung sind die Temperaturen für die Reibringoberfläche, den Kühlkanal sowie die Anbindung eingeflossen.

In den Ergebnissen wird vor allem der Einfluss einer reduzierten Wärmekapazität deutlich, der auf Werkstoffseite in Form der spezifischen Wärmekapazität und auf Geometrie-seite durch die Anpassung des Reibringkörpers (Reibringbreite/Reibpfadhöhe<sup>194</sup>) abgebildet ist. Geringe Abhängigkeiten zur Maximaltemperatur zeigen sich für eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit sowie eine Erhöhung des Wärmeleitwiderstands im Anbindungsbereich des Topfes durch Verkleinerung der Querschnittsfläche im Übergang von Reibringkörper und Topf. Die niedrigere Topftemperatur (-45,6 °C) resultiert aus einer geringeren in den Topf eingeleiteten Wärmemenge. Auffällig ist, dass kein vergleichbarer Temperaturanstieg im Reibringkörper zu beobachten ist. Als Schlussfolgerung wird ein geringer Einfluss der Wärmekapazität des Topfes auf die thermische Leistungsfähigkeit abgeleitet. Der Einfluss des Wärmeübergangs im Kühlkanal ist für das Szenario einer Stoppbremsung erwartungsgemäß gering.

<sup>192</sup> Übersicht der verwendeten Werkstoffdaten, siehe Anhang 13.3

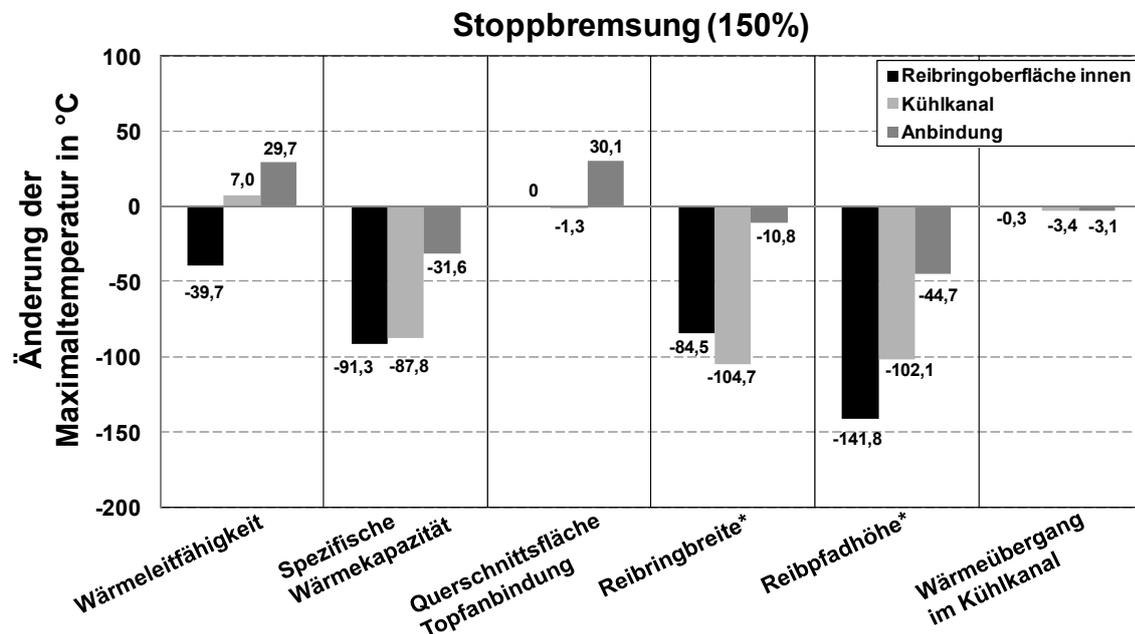
<sup>193</sup> Referenztemperaturen (100 %): Reibringoberfläche innen (455,4 °C); Kühlkanal (361,8 °C); Anbindung (142,4 °C)

<sup>194</sup> Die Reibpfadhöhe beschreibt die Differenz zwischen Außenradius und Innenradius eines Reibrings.



\* Werte für 50 % und 150 % entsprechen der prozentualen Wärmekapazität C bezogen auf die Referenz-Bremsscheibe

Abbildung 6.11: Änderung der Maximaltemperatur bei einer Stoppbremsung und Reduzierung des Parameterwertes auf 50 % der Basis-Bremsscheibe



\* Werte für 50 % und 150 % entsprechen der prozentualen Wärmekapazität C bezogen auf die Referenz-Bremsscheibe

Abbildung 6.12: Änderung der Maximaltemperatur bei einer Stoppbremsung und Erhöhung des Parameterwertes auf 150 % der Basis-Bremsscheibe

Die Ergebnisse für eine Anpassung auf das 1,5-fache der Werte der Basis-Bremsscheibe zeigt Abbildung 6.12. Wie ausgehend von den vorher geschilderten Ergebnissen erwartet, sind die Einflüsse auf die Maximaltemperatur bei Erhöhung des Wärmeübergangs im Kühlkanal sowie bei Vergrößerung der Topfanbindungsfläche von untergeordneter Bedeutung. Bei Erhöhung der Querschnittsfläche im Anbindungsbereich ist ein entgegengesetztes Verhalten der Topftemperatur verglichen mit den zuvor beschriebenen Ergebnissen bei Reduzierung der Querschnittsfläche zu beobachten. Die stärkere Einbindung der Wärmekapazität des Topfes führt in diesem Fall zu einem Temperaturanstieg, jedoch bleibt das Temperaturniveau im Reibringkörper annähernd unverändert. Ein ähnliches Verhalten ist bei Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit zu beobachten. Da die höhere Wärmeleitung auch unmittelbar im Reibringkörper wirkt, wird diese ursächlich für die Reduzierung der Oberflächentemperatur ( $-39,7\text{ °C}$ ) gesehen. Das größte Potenzial zur Senkung der Maximaltemperatur ( $-141,8\text{ °C}$  im Reibring) weist nach den Ergebnissen der Simulation die Anpassung der Wärmekapazität über die Reibpfadhöhe auf.

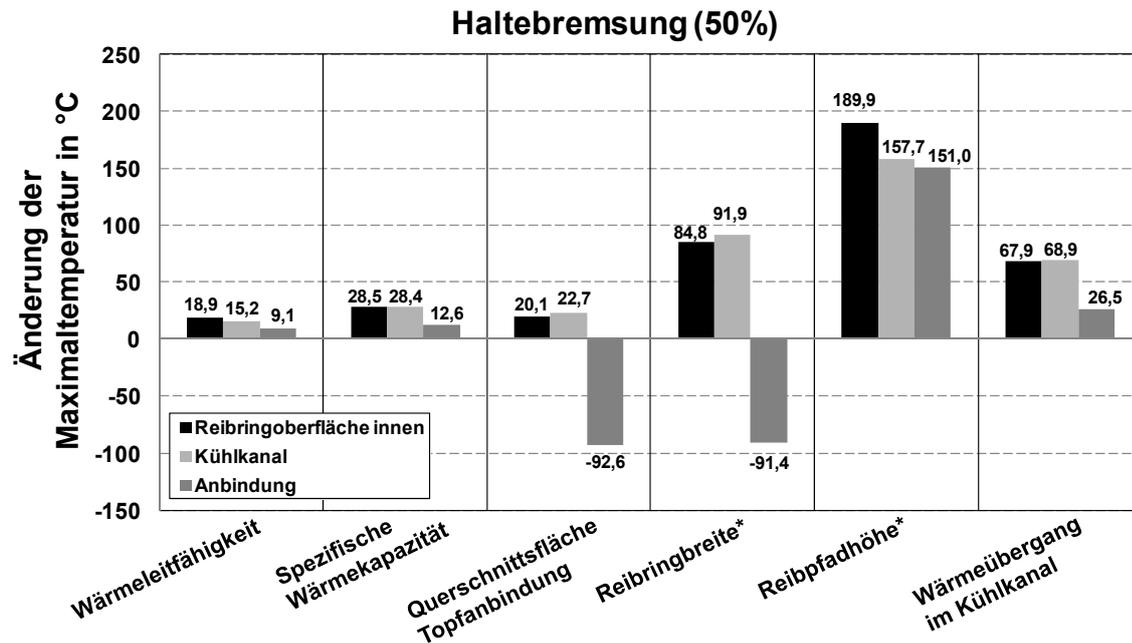
#### 6.2.1.2 Haltebremsung<sup>195</sup>

Für die Simulation der Passabfahrt mit 10 % Gefälle wird im Modell eine Haltebremsung mit konstantem Bremsmoment (entspr.  $D = 1\text{ m/s}^2$ ) herangezogen, wobei die Auswertung analog zu den Untersuchungen im vorangegangenen Abschnitt erfolgt. Abbildung 6.13 zeigt die Ergebnisse einer Haltebremsung für eine Senkung der Variationsparameter auf 50 % der Referenzwerte der Basis-Bremsscheibe. Allen Änderungsumfängen gemein ist ein Anstieg der maximalen Reibring- und Kühlkanaltemperatur. Der größte absolute Anstieg ist bei Reduzierung der Wärmekapazität durch Verringerung der Reibpfadhöhe zu verzeichnen ( $> 150\text{ °C}$ ). Neben der geringeren Wärmekapazität ist wie auch bei der Reduzierung des Wärmeübergangs im Kühlkanal der geringere konvektive Wärmetransport für die im Vergleich stark zunehmenden Temperaturen verantwortlich.

Die Ergebnisse für eine Anpassung auf das 1,5-fache der Werte der Basis-Bremsscheibe sind in Abbildung 6.14 dokumentiert. Es zeigen sich deutlich die Vorteile eines verbesserten konvektiven Wärmeübergangs, insbesondere bei Erhöhung der Reibpfadhöhe sowie bei verbessertem Wärmeübergang im Kühlkanal. Wie bereits bei der Stoppbremsung zu erkennen, führen eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit sowie eine Vergrößerung der Anbindungsfläche zum Topfbereich zu einer deutlichen Zunahme der Topftemperatur. Insbesondere bei Anpassung der Querschnittsfläche ist eine Temperaturabnahme im Reibringkörper bei einem Temperaturniveau im Bereich von  $600\text{ °C}$  vernachlässigbar.

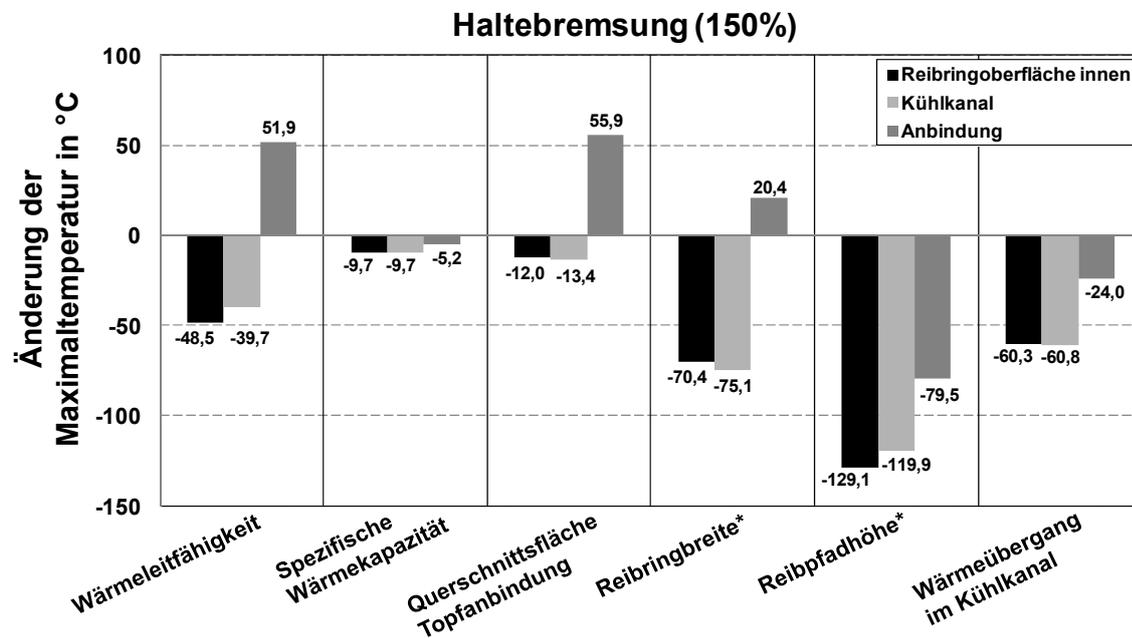
---

<sup>195</sup> Referenztemperaturen (100 %): Reibringoberfläche innen ( $646,0\text{ °C}$ ); Kühlkanal ( $625,2\text{ °C}$ ); Anbindung ( $284,8\text{ °C}$ )



\* Werte für 50 % und 150 % entsprechen der prozentualen Wärmekapazität C bezogen auf die Referenz-Bremsscheibe

Abbildung 6.13: Änderung der Maximaltemperatur bei einer Haltebremsung und Reduzierung des Parameterwertes auf 50 % der Basis-Bremsscheibe



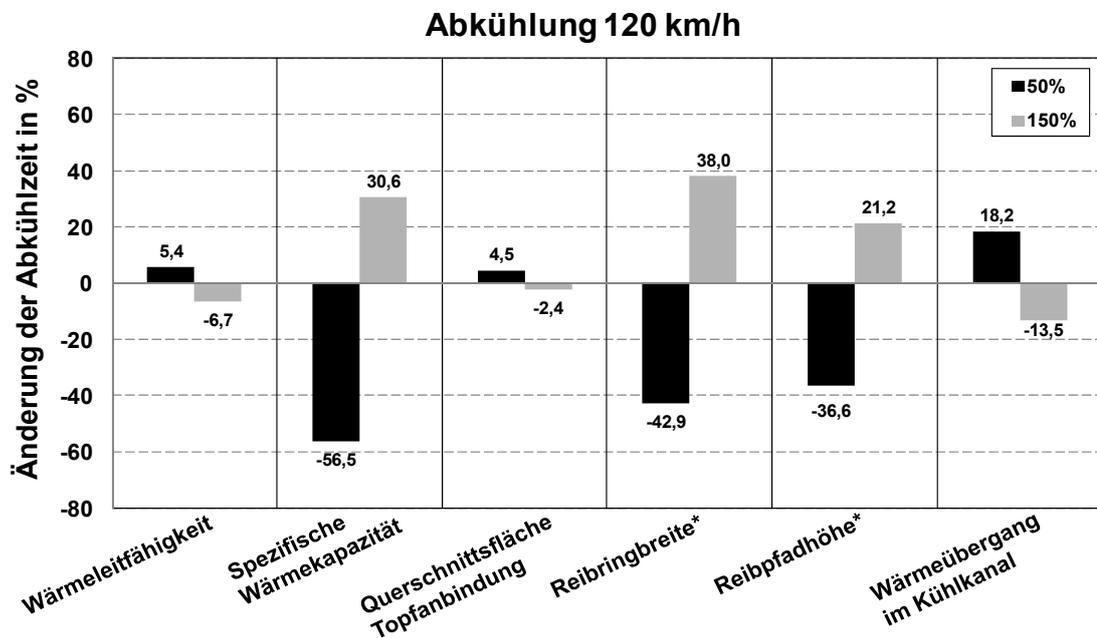
\* Werte für 50 % und 150 % entsprechen der prozentualen Wärmekapazität C bezogen auf die Referenz-Bremsscheibe

Abbildung 6.14: Änderung der Maximaltemperatur bei einer Haltebremsung und Erhöhung des Parameterwertes auf 150 % der Basis-Bremsscheibe

## 6.2.2 Abkühlzeit der Reibringoberfläche bei Variation von Werkstoff und Geometrie

Neben den in der Bremsscheibe auftretenden maximalen Temperaturen ist die Abkühlzeit ein Kriterium zur Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit einer Bremsscheibe. Für die vorliegende Parametervariation zeigt Abbildung 6.15 die Ergebnisse bei einer konstanten Abkühlgeschwindigkeit von 120 km/h für eine Reduzierung (50 %) sowie Erhöhung (150 %) der Parameterwerte.<sup>196</sup>

Für die Abkühlzeit der Bremsscheibe wirkt sich eine Erhöhung der Wärmekapazität durch Änderung des Werkstoffs oder Anpassung der Geometrie (Reibringbreite/Reibpfadhöhe) erwartungsgemäß negativ aus (vgl. Gleichung (6.5)). Aufgrund der Notwendigkeit einer ausreichenden Wärmekapazität für Stoppbremsungen, ist eine Reduzierung der Wärmekapazität für eine Senkung der Abkühlzeit ungeeignet. Vorteile im Hinblick auf die Wärmeabfuhr und eine kürzere Abkühlzeit ergeben sich aus einer Anpassung der Reibpfadhöhe im Vergleich zu einer Aufdickung des Reibrings ( $\Delta t \approx 17\%$ ), was auf eine erhöhte konvektive Wärmeabfuhr zurückzuführen ist. Positiv wirken sich ebenfalls eine Erhöhung des Wärmeübergangs im Kühlkanal sowie eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit aus, was aufgrund der theoretischen Zusammenhänge zu erwarten war.



\* Werte für 50 % und 150 % entsprechen der prozentualen Wärmekapazität C bezogen auf die Referenz-Bremsscheibe

Abbildung 6.15: Prozentuale Änderung der Abkühlzeit bei Variation der Parameterwerte von 50 % und 150 % der Basis-Bremsscheibe

<sup>196</sup> Referenzabkühlzeiten (100 %): Reibringoberfläche innen (552 s); Kühlkanal (551 s); Anbindung (359 s)

### 6.2.3 Fazit und Schlussfolgerung

Die Abhängigkeiten zwischen thermischer Leistungsfähigkeit und Bauteilmasse sind auf Eigenschaftsebene bereits in Kapitel 4 verdeutlicht worden. Insbesondere die Einflüsse der Werkstoff- und Geometrieparameter sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung.

Für die Parameteranalyse werden mit der Abbildung von Stopp- und Haltebremsungen zwei typische Bremsszenarien herangezogen. Der für die Analyse definierte Wertebereich berücksichtigt die Eigenschaften aktueller Bremsscheibenwerkstoffe. Als Referenz für die Ergebnisse dient eine einteilige Bremsscheibe aus Grauguss. Die Parametervariation auf Werkstoffseite verdeutlicht die Einflüsse von Wärmeleitfähigkeit sowie Wärmekapazität. Eine stärkere Einbindung der Wärmekapazität des Topfes zur Senkung des Temperaturniveaus im Reibringkörper wird durch Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit sowie durch Anpassung der Querschnittsfläche in der Anbindungszone untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperatur im Reibringkörper bei Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit deutlich stärker sinkt als dies mit zunehmender Querschnittsfläche der Fall ist. Die Vorteile einer erhöhten Wärmeleitung zeigen sich insbesondere bei Schlepptbremsungen sowie in der Abkühlphase.

Die Einflüsse einer Änderung der Wärmekapazität werden ebenfalls für Werkstoff- und Geometrieänderungen betrachtet. Hierbei zeigt sich, dass bei einer erforderlichen Erhöhung der Wärmekapazität, beispielsweise bedingt durch die Verwendung eines Werkstoffs geringerer Wärmekapazität, eine Anpassung der Reibpfadhöhe einer Aufdickung des Reibringkörpers vorzuziehen ist. Die bei einer Reibpfaderhöhung zunehmende Kontaktfläche mit der Umgebungsluft begünstigt die Wärmeabfuhr durch Konvektion und Strahlung.

Als weiterer Untersuchungsschwerpunkt wird der Einfluss des konvektiven Wärmeübergangs im Kühlkanal analysiert. Erwartungsgemäß ist der Einfluss durch Änderung des Wärmeübergangs im Kühlkanal auf das maximale Temperaturniveau bei einer Stoppbremsung vernachlässigbar. Die Vorteile einer Vergrößerung des Wärmeübergangskoeffizienten werden vor allem in den Abkühlphasen deutlich. Dieser positive Effekt zeigt sich auch bei der simulierten Passabfahrt in Form eines geringeren Temperaturniveaus in der Bremsscheibe.

Die aus der Simulation gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Konzeptbewertung ein und unterstützen den Auswahlprozess, auf den im Detail im folgenden Kapitel 7 eingegangen wird.

## 7 Konzeptauswahl

Ausgehend von den Ergebnissen der Systematisierung (Kapitel 5) und der thermischen Parameteranalyse (Kapitel 6) werden in diesem Kapitel unter Berücksichtigung der Zielsetzung drei Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben abgeleitet, die aufgrund ihres Eigenschaftsprofils unterschiedliche Bereiche im Lösungsraum (vgl. Kapitel 3, Abbildung 3.1) adressieren.

### Konzept 1 – Umformend hergestellte Leichtbau-Bremsscheibe

Als Hauptgrund für die geringe Marktdurchdringung von Leichtbau-Bremsscheiben ist in den Ausführungen zum Stand der Technik der erhöhte Aufwand, unter dem in dieser Arbeit kostenbeeinflussende Eigenschaften in Form der eingesetzten Fertigungsverfahren und Werkstoffe verstanden werden, identifiziert worden. Wesentliche Einflussgrößen sind in diesem Zusammenhang die höheren Kosten für Leichtbauwerkstoffe sowie bedingt durch die Mehrteiligkeit von Verbundbremsscheiben aufwändigere Fertigungsverfahren. Ausgehend davon verfolgt das erste Leichtbau-Konzept das Ziel, die Anzahl der Prozessschritte durch den Einsatz geeigneter Fertigungsverfahren zu reduzieren und damit ein Potenzial zur Reduzierung der Kosten zu schaffen. Die Grundidee besteht darin, Topffertigung und Anbindung ohne den Einsatz zusätzlicher Verbindungselemente in einem Prozessschritt zu realisieren. Ausgangsbasis bildet die bewährte Werkstoffkombination aus Grauguss und Aluminium. Für die fertigungstechnische Umsetzung bieten sich vor allem urformende und umformende Verfahren an. In diesem Zusammenhang sind mit der Sheet-Cast-Disc<sup>197</sup> sowie der Verbundgusscheibe der Firma Brembo<sup>198</sup> zwei Konzepte zu nennen, die sich durch eine direkte Integration der Verbindungsherstellung in den Gießprozess auszeichnen.

Ausgehend von einer Analogie zur Fertigung von innenverzahnten Hohlrädern als drehmomentübertragende Komponente wird ein Bremsscheiben-Konzept abgeleitet, bei dem die Topfherstellung und Anbindung an den Reibringkörper über die umformenden Fertigungsverfahren Drücken und Drückwalzen erfolgt. Der Anbindungsbereich des Reibrings sieht hierzu eine über den Umfang verteilte Zahngeometrie vor, in die der Bremsscheibentopf derart eingeformt wird, dass eine in Umfangsrichtung formschlüssige Verbindung entsteht. Die Vorteile des beschriebenen Konzepts für eine umformend hergestellte Leichtbau-Bremsscheibe werden neben der Einsparung von Fertigungs-

---

<sup>197</sup> Vgl. Kapitel 2.2.3.1, S. 14

<sup>198</sup> Vgl. Kapitel 2.2.3.1, S. 13

schritten und einem daraus abgeleiteten Kostenpotenzial zudem durch die einfache Ausgangsgeometrie des Topfes in Form einer Aluminium-Kreisringscheibe erwartet. Die Ausarbeitung und Bewertung des Konzepts erfolgt in Kapitel 8.

### Konzept 2 – Reibgeschweißte Leichtbau-Bremsscheibe

Die in Kapitel 5 dargestellte Systematik zeigt auf Funktionsebene Konzepte für Brems-scheiben, deren Grundidee sich durch eine Vergrößerung der Wärmeübergangsflächen zur Verbesserung der Kühlung auszeichnet. Dieser funktionale Ansatz ist im Rahmen der thermischen Analyse in Kapitel 6 untersucht worden. Die Ergebnisse zeigen insbesondere für Haltebremsungen das Potenzial eines erhöhten Wärmeübergangs im Kühlkanal in Bezug auf eine Senkung der Maximaltemperatur sowie der Abkühlzeit. Übertragen auf die Praxis ist eine Steigerung der Wärmeübergangsfläche durch die Realisierung eines zweiten Kühlkanals möglich wie es beispielsweise in DE 10 2005 033 352 A1<sup>199</sup> in Form eines in den Kühlkanal integrierten Blechs beschrieben wird.

Die Integration eines Blechs in den Kühlkanal bildet das wesentliche Merkmal des zweiten in dieser Arbeit diskutierten Konzepts für eine Leichtbau-Bremsscheibe. Aufgrund der Temperaturen im Reibringkörper wird das Blech in Stahl ausgeführt. Das Ziel ist eine Integration des Blechs im Rahmen der Reibringkörperfertigung. Hinsichtlich der thermischen Leistungsfähigkeit ist bedingt durch die Vergrößerung der wirksamen Wärmeübergangsfläche eine erhöhte Kühlleistung zu erwarten. In diesem Zusammenhang ist ein mögliches Leichtbaupotenzial durch Reduzierung der erforderlichen Wärmekapazität im Reibringkörper zu prüfen. Zur Reduzierung der Masse erfolgt darüber hinaus eine Werkstoffsubstitution im Topf. Wie von anderen Verbundbremsscheiben bereits bekannt, wird für den Topf eine Aluminiumlegierung verwendet. Die Verbindung zwischen Topf und Reibringkörper erfolgt über das mittig in den Kühlkanal integrierte Blech. Durch die mittige Anbindung sind Vorteile in Bezug auf das Schirmungsverhalten zu erwarten, wie bereits in Kapitel 2.2.3.1 erläutert. Charakteristisch für das dargestellte Konzept ist die damit im Blech realisierte Funktionsintegration bestehend aus Kühlfunktion und Topfanbindung zur Übertragung des Bremsmoments.

Für die fertigungstechnische Realisierung wird eine stoffschlüssige Verbindung gewählt. Durch den Verzicht auf Verbindungselemente und den daraus resultierenden Entfall zusätzlicher Prozessschritte werden Vorteile im Hinblick auf den Fertigungsaufwand gesehen. Als stoffschlüssiges Fügeverfahren wird das Reibschweißen gewählt, das bereits erfolgreich im Automotivbereich in der Fertigung drehmomentübertragender Komponenten wie Gelenkwellen eingesetzt wird.<sup>200</sup> Der Einsatz für eine Bremsscheibe

---

<sup>199</sup> Kraft, K.; Körner, M.; Repmann, C.: Offenlegungsschrift DE 10 2005 033 352 A1, 2005

<sup>200</sup> Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1, 2006, S. 129

wird beispielsweise in DE 10 2010 007 082 A1<sup>201</sup> beschrieben. Im Gegensatz zu anderen Schweißverfahren zeichnet sich das Reibschweißen durch den Verzicht von Schweißzusätzen aus sowie der Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffe stoffschlüssig zu verbinden,<sup>202</sup> was im Hinblick auf die vorliegende Materialpaarung von Aluminium (Topf) und Stahl (Blech) erforderlich ist. Ein weiterer Vorteil des Reibschweißens in Bezug auf eine Reduzierung des Fertigungsaufwands sind kurze Schweißzeiten.<sup>203</sup> Zusammenfassend wird das Konzept der reibgeschweißten Leichtbau-Bremsscheibe durch die Integration eines Funktionsblechs in den Kühlkanal beschrieben, mit dem Ziel einer Verbesserung von Wärmeübergang und Schirmungsverhalten sowie der Anbindung eines Leichtbautopfes an den Reibringkörper. Die Ausarbeitung und Konzeptbewertung auf Basis von Versuchen erfolgt in Kapitel 9.

### Konzept 3 – Hybrid-Bremsscheibe

Verglichen mit einteiligen Grauguss-Bremsscheiben ist mit aktuellen Serien-Bremsscheiben eine Massenersparnis von etwa 20 % für metallische Leichtbau-Bremsscheiben in Verbundbauweise und von etwa 65 % für Bremsscheiben auf Basis keramischer Werkstoffe realisierbar (vgl. Kapitel 2.4). Bezüglich der erreichbaren Massenersparnis sind Bremsscheiben auf Basis verstärkter Aluminiumlegierungen (Al-MMC) im Lösungsraum zwischen den oben beschriebenen Leichtbau-Bremsscheiben zu positionieren. Im Stand der Forschung und Technik in Kapitel 2.2.3.3 sind bereits die Vor- und Nachteile von Aluminium-MMC-Bremsscheiben genannt worden. Vorteile resultieren aus der geringen Dichte sowie der im Vergleich zu Grauguss höheren Wärmeleitfähigkeit und massebezogenen Wärmekapazität, die vor allem bei Haltebremsungen genutzt wird, was auch die Ergebnisse der thermischen Simulation in Kapitel 6.2 zeigen. Demgegenüber stehen die nachteiligen Reib- und Verschleißigenschaften sowie die limitierte thermische Festigkeit, insbesondere bei Bremsszenarien mit hoher Energiezufuhr in kurzer Zeit. Die gegenüber Grauguss geringere volumenbezogene Wärmekapazität von Aluminiumwerkstoffen in Verbindung mit dem limitierten zur Verfügung stehenden Bauraum im Radhaus erschwert mit zunehmender Fahrzeugmasse die Umsetzung einer Bremsscheibe mit ausreichender Wärmekapazität.

Ausgehend von den genannten funktionalen Nachteilen wird die Zielsetzung für das Konzept einer Leichtbau-Bremsscheibe auf Basis von Aluminium formuliert. Neben einer Verbesserung der Verschleißfestigkeit der Reibflächen ist die thermische Leistungsfähigkeit zu erhöhen, so dass eine Überhitzung der Bremsscheibe, insbesondere bei den bezüglich der Spitzentemperaturen als kritisch bewerteten Stoppbremsungen,

---

<sup>201</sup> Zametica, H.; Schmitz, J.; Hoffmann, I.: Offenlegungsschrift DE 10 2010 007 082 A1, 2010

<sup>202</sup> Fahrenwaldt, H. J.; Schuler, V.: Praxiswissen Schweißtechnik, 2006, S. 101

<sup>203</sup> Fahrenwaldt, H. J.; Schuler, V.: Praxiswissen Schweißtechnik, 2006, S. 101

vermieden wird. Als Ziel für die erreichbare Massenersparnis wird die Positionierung zwischen aktuellen metallischen und keramischen Verbundbremsscheiben definiert.

Grundlage für die Auflösung der Problemstellung bildet der in Kapitel 5.2.3 dargestellte Lösungsraum für Teilfunktionen einer Bremsscheibe. Ausgehend von einer einteiligen Bremsscheibe erfolgt eine funktionale Aufteilung, wie sie in Kapitel 5.2.3 (Tabelle 5.4, S. 55) konzeptionell in Form eines funktional unterteilten Reibringkörpers mit separaten Verschleißelementen dargestellt ist. Aufgrund bekannter Reib- und Verschleißigenschaften werden die Verschleißelemente für das vorliegende Konzept in Grauguss ausgeführt. Als Vorteil im Vergleich zu keramischen Werkstoffen wird neben einem geringeren Unterschied in den zulässigen Maximaltemperaturen die höhere volumenbezogene Wärmekapazität von Grauguss gesehen. Somit ergibt sich die Möglichkeit die Verschleißelemente als zusätzliche Wärmekapazität zu nutzen, um die thermischen Anforderungen zu erfüllen. Aufgrund der im Vergleich zu herkömmlichen Aluminiumlegierungen besseren thermischen und mechanischen Eigenschaften ist eine Umsetzung des Grundkörpers sowie des Topfes in verstärktem Aluminium vorzusehen. Zusammenfassend ist das Konzept der Hybrid-Bremsscheibe durch den Grundaufbau aus einer Aluminiumlegierung sowie der funktionalen Trennung im Reibringkörper gekennzeichnet, wodurch es sich von einteiligen Bremsscheiben auf Basis von Aluminiumwerkstoffen abgrenzt. Die Ausarbeitung des Konzepts sowie die Bewertung in Simulation und Versuch erfolgt in Kapitel 10.

Im Hinblick auf den in der Zielsetzung in Kapitel 3.1 dargestellten Lösungsraum werden die drei vorgestellten Konzepte entsprechend Abbildung 7.1 eingeordnet.

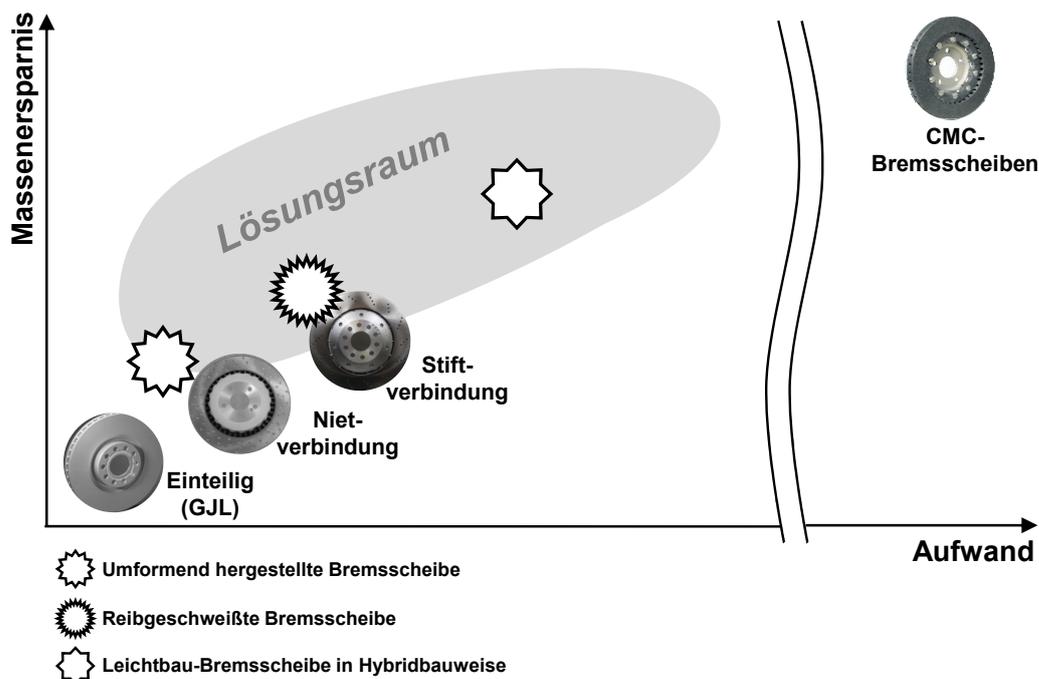


Abbildung 7.1: Positionierung der drei abgeleiteten Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben im Lösungsraum

## 8 Umformend hergestellte Leichtbau-Bremsscheibe

### 8.1 Grundlagen der Prozesse Drücken und Drückwalzen

Drücken und Drückwalzen sind Verfahren der Umformtechnik, die zur Herstellung von rotationssymmetrischen Hohlkörpern, wie beispielsweise Brems- und Hydraulikzylindern<sup>204</sup> oder Leichtmetallrädern<sup>205</sup>, eingesetzt werden. In Abhängigkeit der Ausgangsgeometrie wird beim Drückwalzen zwischen Projizier- und Zylinder-Drückwalzen differenziert. Abbildung 8.1 zeigt Prinzipdarstellungen der Verfahren Drücken und Drückwalzen. Die wesentlichen Merkmale der beiden Verfahren sind im Vergleich in Tabelle 8.1 dargestellt.

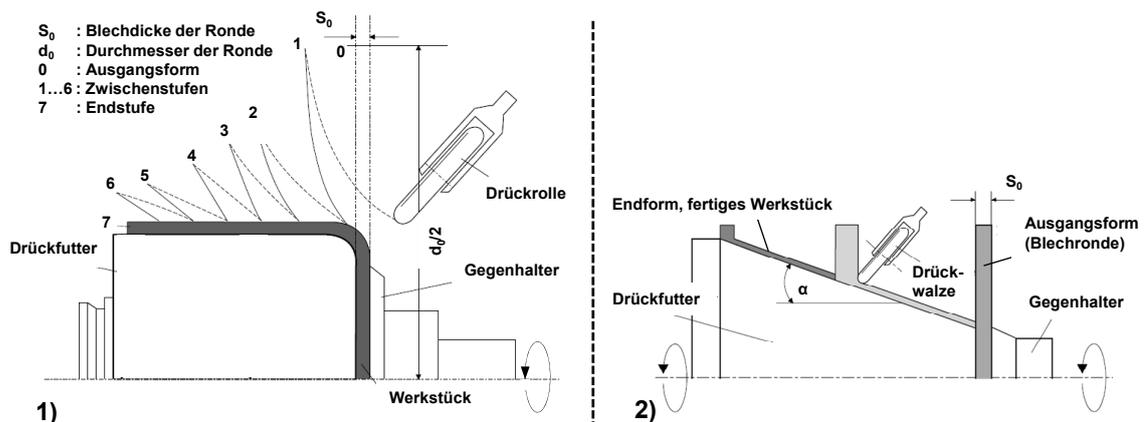


Abbildung 8.1: Prinzipdarstellung der Umformverfahren Drücken (1) und Drückwalzen (2)<sup>206</sup>

Neben den in Tabelle 8.1 dargestellten Differenzierungsmerkmalen zeichnen sich beide Verfahren durch das Erreichen hoher Umformgrade aus, wobei sich die daraus resultierende Kaltverfestigung positiv auf Dauerfestigkeit und Kerbempfindlichkeit der Bauteile auswirkt.<sup>207</sup> Weitere Vorteile ergeben sich im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit. So

<sup>204</sup> Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4, 2006, S. 386

<sup>205</sup> Bönning, M.: Konzepte zur Optimierung von Pkw-Rädern, 2002

<sup>206</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an: Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4, 2006, S. 378 und S. 380

<sup>207</sup> Runge, M.: Drücken und Drückwalzen, 1993, S. 6

sind die Drückwerkzeuge größtenteils nicht an die Werkstückgeometrie gebunden.<sup>208</sup> Die hohe Maß- und Formgenauigkeit in Verbindung mit hoher Oberflächengüte ermöglichen eine endkonturnahe Fertigung, die den Nachbearbeitungsaufwand reduziert und sich ebenfalls positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.<sup>209</sup>

Tabelle 8.1: Zielsetzung und Randbedingungen für die Parametervariation<sup>210,211</sup>

	<b>Drücken</b>	<b>Drückwalzen</b>
<b>Spannungszustand</b>	Zugdruckumformung	Druckumformung
<b>Werkstückgeometrie</b>	<u>Ausgangsteil:</u> Blechronde, vorgeformte Tiefziehteile  <u>Wandstärke:</u> Bleibt annähernd gleich	<u>Ausgangsteil:</u> Ronde / Vorform (Projizier-Drückwalzen), Rohr / Napf zylindrischer Form (Zylinder-Drückwalzen)  <u>Wandstärke:</u> Wanddickenreduktion bis zu 90 %
<b>Prozessablauf</b>	Die zwischen Gegenhalter und Drückfutter eingespannte rotierende Ronde wird mit einer Drückrolle zumeist stufenweise bis zum Erreichen der Endform umgeformt. Die Umformung erfolgt dabei nur örtlich.	Die Ausgangsform wird zwischen Gegenhalter und Drückfutter eingespannt. Aus der Verschiebung der Werkstoff-Volumenelemente parallel zur Rotationsachse resultiert die Reduzierung der Wandstärke. Somit bleiben Außendurchmesser von Ausgangs- und Endform gleich. Im Gegensatz zum Drücken wird die Endform meist in einem Überlauf erzeugt.

## 8.2 Prototypische Umsetzung

Ein spezieller Anwendungsfall des Drückwalzens stellt die Fertigung innenverzahnter Hohlräder dar wie sie beispielsweise in Planetengetrieben zum Einsatz kommen. Im Gegensatz zum konventionellen Drückwalzen wird in diesem Fall das Ausgangswerkstück über einen Walzdorn mit Längsnuten umgeformt. Hieraus leitet sich die Analogie

<sup>208</sup> Runge, M.: Drücken und Drückwalzen, 1993, S. 5

<sup>209</sup> Runge, M.: Drücken und Drückwalzen, 1993, S. 13, S. 46, S. 51

<sup>210</sup> Runge, M.: Drücken und Drückwalzen, 1993

<sup>211</sup> Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4, 2006, S. 377 ff.

für das Fertigungskonzept der Leichtbau-Bremsscheibe ab, wobei der Reibringkörper die Funktion des Walzdorns übernimmt (vgl. Abbildung 8.2). Der Topf wird aus einer Ronde in die Verzahnung eingewalzt, so dass sich eine kombiniert-schlüssige Verbindung aus Form- und Reibkraftschluss ergibt.

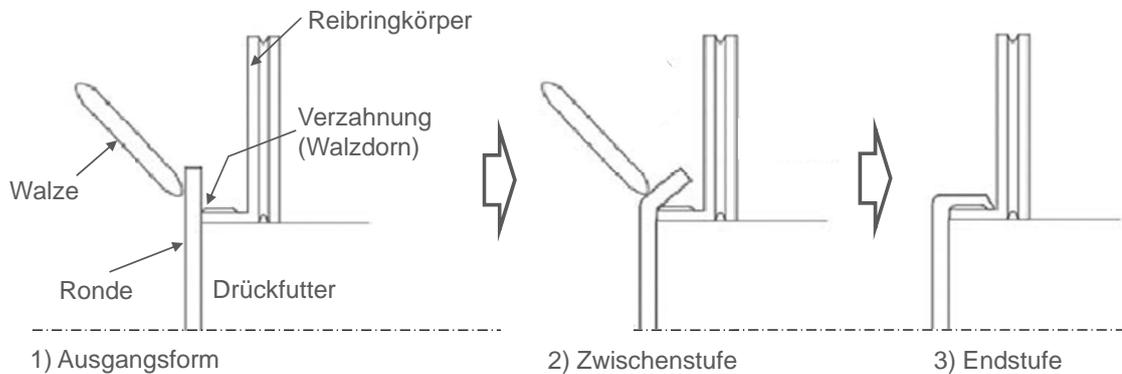
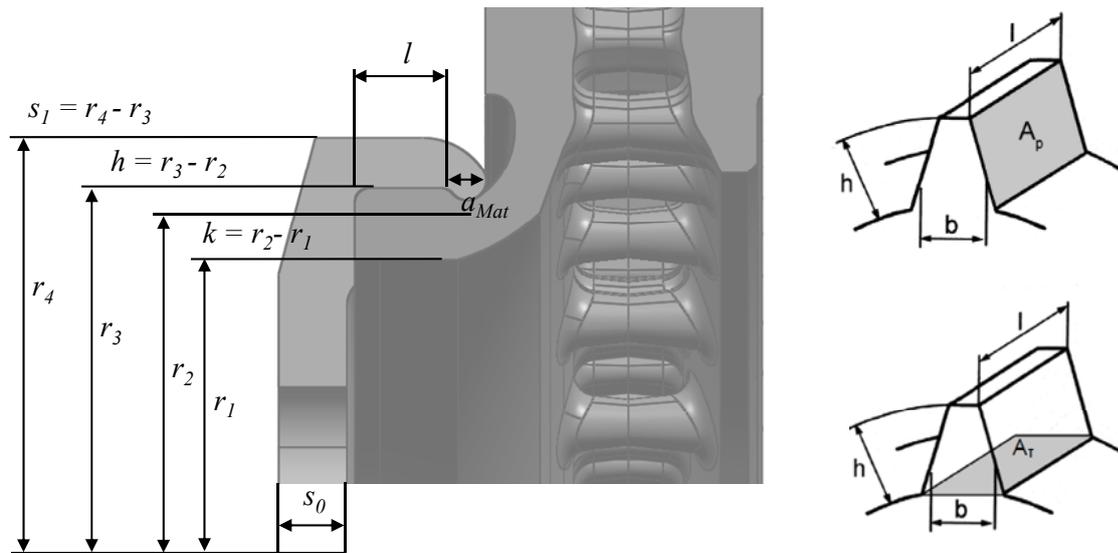


Abbildung 8.2: Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses für eine umformend hergestellte Leichtbau-Bremsscheibe

### 8.2.1 Konzeptauslegung

Die Schwerpunkte der Konzeptauslegung liegen vor allem in der Gestaltung der Anbindungszone, wobei die sichere Übertragung des Bremsmoments und die axiale Sicherung des Bremsscheibentopfes von Bedeutung sind. Die Anzahl sowie die geometrische Gestaltung der Formelemente sind grundlegend für die sichere Übertragung des Bremsmoments. Die Auslegung erfolgt vereinfacht mit der Annahme einer rein formschlüssigen Verbindung. Für die Ausgestaltung der Anbindungszone ergeben sich die Randbedingungen aus dem maximalen Bremsmoment sowie der zulässigen Flächenpressung und Scherspannung der Profilelemente. Aufgrund des Einsatzes verschiedener Werkstoffe für die Verzahnung und dem Ziel einer gleichmäßigen Werkstoffausnutzung wird die Breite für Topf und Reibringkörper separat berechnet. Abbildung 8.3 zeigt exemplarisch die relevanten Abmessungen der Bremsscheibe sowie der Verzahnung.

Aus dem Fertigungsprozess des Bremsscheibentopfes resultiert in axialer Richtung eine rein reibkraftschlüssige Verbindung. Um das Auftreten eines axialen Spiels durch die im Betrieb wirkenden Spannkkräfte und thermisch bedingte Einflüsse zu unterbinden, wird die reibkraftschlüssige Komponente um eine formschlüssige Komponente erweitert. Hierzu wird ein Hinterschnitt mit dem Materialvorlauf  $a_{Mat}$  realisiert.



$A_{p,r}$ :	Projizierte Fläche	$r_1$ :	Innenradius Reibringfügefläche
$a_{Mat}$ :	Materialvorlauf	$r_2$ :	Innenradius Bremsscheibentopf
$b$ :	Profilelementbreite	$r_3$ :	Außenradius Reibringfügefläche
$h$ :	Profilelementhöhe	$r_4$ :	Außenradius Bremsscheibentopf
$k$ :	Wandstärke Reibringkörper	$s_0$ :	Wandstärke Ronde
$l$ :	Profilelementlänge	$s_1$ :	Wandstärke Bremsscheibentopf

Abbildung 8.3: Übersicht der relevanten geometrischen Parameter für die Verzahnungsauslegung<sup>212</sup>

### 8.2.1.1 Geometrische und technische Randbedingungen

Die Grundlage für den Auslegungsprozess bilden die Geometrie und Leistungsdaten der einteiligen Bremsscheibe. Daraus resultieren die nachfolgenden Randbedingungen.

#### Zu übertragendes Bremsmoment:

Neben den geometrischen Größen ist das maximal auftretende Bremsmoment bekannt. Aus Prüfstandsuntersuchungen an der einteiligen Bremsscheibe wurde ein maximales Bremsmoment  $M_{Brems,max} = 3700 \text{ Nm}$  ermittelt, das in die Auslegung einbezogen wird.

#### Werkstoff Bremsscheibentopf:

Als Werkstoff kommt die für den Anwendungsfall eines Bremsscheibentopfes bereits bewährte Aluminiumlegierung AlMg3 (DIN EN 573) zum Einsatz, die sich unter anderem durch eine gute Korrosionsbeständigkeit auszeichnet.<sup>213</sup>

<sup>212</sup> Die Profilelementbreite  $b$  wird im vorliegenden Fall für  $h/2$  bestimmt.

<sup>213</sup> Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, 2007, S.468

Radialer Bauraum:

Aus dem Innen- und Außenradius der Bremsscheibe resultieren die Grenzen für die Höhe der Formelemente. Der Innenradius des Reibringkörpers entspricht dem Innenradius der Reibringfügefläche  $r_1 = 153,4$  mm. Der Außenradius im Topfbereich beträgt  $r_4 = 166$  mm.

Axialer Bauraum:

Der Abstand zwischen Topfanlagefläche und äußerer Reibringfläche beträgt 22,4 mm. Abzüglich der erforderlichen Topfwandstärke  $s_0$  ergibt sich die maximal mögliche Profilelementlänge. Hinsichtlich einer hohen Massensparnis ist das Ziel den besten Kompromiss zwischen Leichtbau und Funktionssicherheit zu realisieren.

Wandstärken Bremsscheibentopf und Reibringkörper:

Die erforderlichen Wandstärken  $s_l$  (Bremsscheibentopf) und  $k$  (Reibringkörper) ergeben sich aus dem Vergleich der zulässigen Schubspannung  $\tau_{zul}$  sowie der im Betrieb maximal auftretenden Schubspannung  $\tau_{max}$ . Diese ist abhängig von der Dehngrenze des eingesetzten Werkstoffs, dem maximalen Bremsmoment  $M_{Brems,max}$  sowie dem Torsionswiderstandsmoment  $W_T$ . Die entsprechenden Zusammenhänge zeigt Gleichung (8.1).

$$\tau_{max} = \frac{M_{Brems}}{W_T} \quad \text{mit} \quad W_T = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r_4^4 - r_3^4}{r_4} \quad (8.1)$$

Die maximale Schubspannung  $\tau_{max}$  wird ausgehend von den Dehngrenzen für die verwendeten Werkstoffe unter Einbeziehung eines Sicherheitsfaktors  $S = 2$  ermittelt (vgl. Gleichungen (8.2) und (8.3)). Die Grundlage für die Berechnung der maximalen Schubspannung  $\tau_{max}$  bilden die Normalspannungshypothese (GJL) und die Gestaltänderungsenergiehypothese (AlMg3).

$$\sigma_{zul} = \frac{R_{p0,2}}{S} \quad (\text{für AlMg3}) \quad \sigma_{zul} = \frac{R_{p0,1}}{S} \quad (\text{für GJL}) \quad (8.2)$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{zul}}{\sqrt{3}} \quad (\text{für AlMg3}) \quad \tau_{max} = \sigma_{zul} \quad (\text{für GJL}) \quad (8.3)$$

## 8.2.1.2 Auslegung der Profilelemente

Die Profilelementgestaltung des Reibringkörpers gibt direkt die Geometrie der resultierenden Topfverzahnung vor. Die entstehende Verzahnung muss das maximale Bremsmoment übertragen, ohne dass die zulässigen Grenzwerte für Scherspannung und Flächenpressung überschritten werden. Für die Bestimmung der erforderlichen Anzahl  $n$  an Profilelementen ist die wirksame Flächenpressung  $p$  auf den Zahnflanken  $A_p$  des schwächeren Werkstoffpartners (AlMg3) entscheidend. Sie ist abhängig von Länge  $l$  und Höhe  $h$  des Profilelements und wird durch die Gleichungen (8.4) und (8.5) beschrieben.

Weiterhin beeinflusst die Formfüllung  $\varphi_V$  die Höhe der resultierenden Flächenpressung. Für die Bestimmung des Sicherheitsfaktors  $S_p$  ist im vorliegenden Fall der Topfwerkstoff als schwächerer Werkstoffpartner heranzuziehen. Daraus resultiert ein Sicherheitsfaktor  $S_p = 2$  für duktile Werkstoffe und unter Annahme schwellender Belastung.

$$p = \frac{2 \cdot M_{Bremms}}{(2 \cdot r_3 - h) \cdot \varphi_V \cdot n \cdot A_p} \quad \text{mit } A_p = h \cdot l \quad (8.4)$$

$$p = p_{zul} \quad \text{mit } p_{zul} = \frac{R_{p0,2}}{S_p} \quad (8.5)$$

Die erforderliche Breite  $b$  der Profilelemente resultiert aus der vorliegenden Scherspannung  $\tau$  im Bauteil. Diese berechnet sich entsprechend der nachfolgenden Gleichungen.

$$\tau = \frac{M_{Bremms}}{(r_3 - h) \cdot n \cdot A_\tau} \quad \text{mit } A_\tau = b \cdot l \quad (8.6)$$

$$\tau = \tau_{zul} \quad \text{mit } \tau_{zul} = \frac{R_{p0,2}}{S_\tau} \quad (8.7)$$

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 8.2.1.1 genannten Randbedingungen und der Auslegungskriterien ergeben sich die in Tabelle 8.2 aufgelisteten Parameter für die Verzahnung der Prototyp-Bremsscheibe. Für die Auslegung auf zulässige Flächenpressung wird der schwächere Werkstoffpartner berücksichtigt, was im vorliegenden Fall die Aluminiumlegierung ist.

Tabelle 8.2: Verzahnungsparameter der Prototyp-Bremsscheibe

	Reibringgrundkörper	Topf
Anzahl der Profilelemente	45	
Höhe $h$ in mm	3,3	
Länge $l$ in mm	10,1	9,8 (mittlere Länge)
Breite $b$ im Zahngrund in mm	3,94	7,78
Projizierte Fläche $A_p$ in mm <sup>2</sup>	32,7	
Flächenpressung $p$ in N/mm <sup>2</sup>	30,4	
Sicherheitsfaktor $S_p$	2,63	
Projizierte Fläche $A_\tau$ in mm <sup>2</sup>	72,79	65,95
Schubspannung $\tau$ in N/mm <sup>2</sup>	13,5	15,4
Sicherheitsfaktor $S_\tau$	7	5,2

Die aus der Auslegung resultierenden Sicherheitsfaktoren werden unter Annahme einer kompletten Formfüllung ( $\varphi_V = 100\%$ ) ermittelt. Der Grenzfall einer noch ausreichenden Formfüllung für einen Sicherheitsfaktor  $S_p = 2$  ergibt sich bei  $\varphi_V \geq 76\%$ . Abbildung 8.4 zeigt die finale Formelementgeometrie des Reibringkörpers.



Abbildung 8.4: Verzahnungsgeometrie des Reibringkörpers

Die radialen Abmessungen von Topf und Reibringkörper sowie die nach dem Umformprozess angestrebten Wandstärken von Reibringkörper und Bremsscheibentopf sind in Tabelle 8.3 aufgeführt. Die aus den Wandstärken von Topf und Reibringkörper resultierenden Sicherheitsfaktoren ( $S_{TO} = 3,1$ ,  $S_{RR} = 2,6$ ) liegen über der erforderlichen Mindestsicherheit von  $S = 2$  für schwelende Belastung.

Tabelle 8.3: Radien und Wandstärken der Prototyp-Bremsscheibe

<b>Innenradius Reibringfügefläche <math>r_1</math> in mm</b>	76,5
<b>Außenradius Bremsscheibentopf <math>r_4</math> in mm</b>	89,8
<b>Innenradius Bremsscheibentopf <math>r_2</math> in mm</b>	81
<b>Außenradius Reibringfügefläche <math>r_3</math> in mm</b>	84,3
<b>Wandstärke Anlagefläche Topf <math>s_0</math> in mm</b>	7,4 – 8,25
<b>Wandstärke Mantelfläche Topf <math>s_1</math> in mm</b>	5,5
<b>Wandstärke Reibringkörper <math>k</math> in mm</b>	4,5

Neben den funktionalen Randbedingungen sind fertigungstechnische Aspekte in der Auslegung zu berücksichtigen. Die Gestalt der Formelemente beeinflusst die Auswahl und den Ablauf des Fertigungsverfahrens und ist somit ein kostenrelevantes Kriterium. Für die Prototypenbremsscheiben ist die Verzahnung durch spanende Bearbeitung realisiert worden, was vergleichsweise hohe Werkzeugkosten sowie einen erhöhten Zeitaufwand bedingt. Im Hinblick auf eine kostenoptimierte Fertigung ist die Einbindung in die Gießform anzustreben.

## 8.2.2 Prototypenfertigung<sup>214</sup>

Aufbauend auf der im vorangegangenen Abschnitt festgelegten Geometrie der Prototyp-Bremsscheibe werden nachfolgend die wesentlichen Aspekte der fertigungstechnischen Umsetzung diskutiert.

Eine zentrale Herausforderung für die Fertigung bildete der geringe zur Verfügung stehende axiale Bauraum. Zur Realisierung einer bestmöglichen Formfüllung kommen zwei formgebende Profilwalzen zum Einsatz. Im Gegensatz zu herkömmlichen Walzen zeichnen sie sich dadurch aus, dass ihre Außenkontur der angestrebten Bauteilgeometrie nach dem Umformprozess entspricht. Prozessseitig bedingt diese Geometrie neben dem axialen Verfahrweg eine zusätzliche radiale Komponente. In Abbildung 8.5 sind Werkstück- und Werkzeugaufbau sowie Geometrie der Profilwalzen schematisch dargestellt.

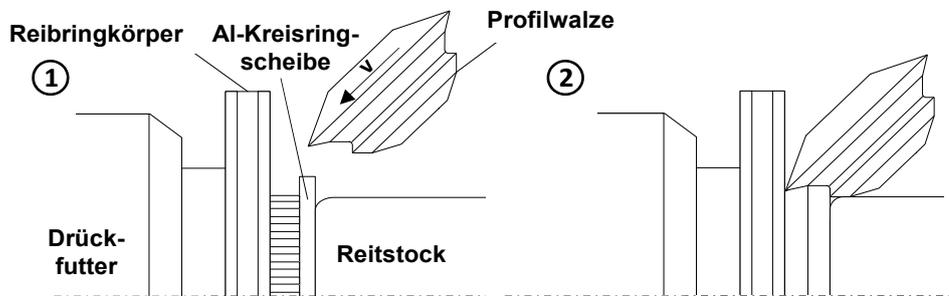


Abbildung 8.5: Schematische Darstellung des Umformprozesses zur Herstellung der umformend hergestellten Leichtbau-Bremsscheibe

Für die Aluminiumronde hat sich in den Versuchen eine Rondenwandstärke von 10 mm bei einem Außendurchmesser von 199 mm im Hinblick auf eine ausreichende Wandstärke und Formfüllung bewährt. Die nach dem Umformprozess vorliegenden Wandstärken des Topfmantels  $s_1$  liegen im Bereich der Verzahnung zwischen 4,5 mm und 6,0 mm (vgl. Abbildung 8.6), so dass die angestrebte Wandstärke von 5,5 mm in einigen Bereichen unterschritten wird. Der Sicherheitsfaktor für die minimale Wandstärke liegt bei  $S = 2,55$ , womit der für schwelende Beanspruchung geltende Sicherheitsfaktor von  $S = 2$  nicht unterschritten wird.

<sup>214</sup> Die Fertigung der Prototypen erfolgte bei Fa. Leifeld, Ahlen/Westf.

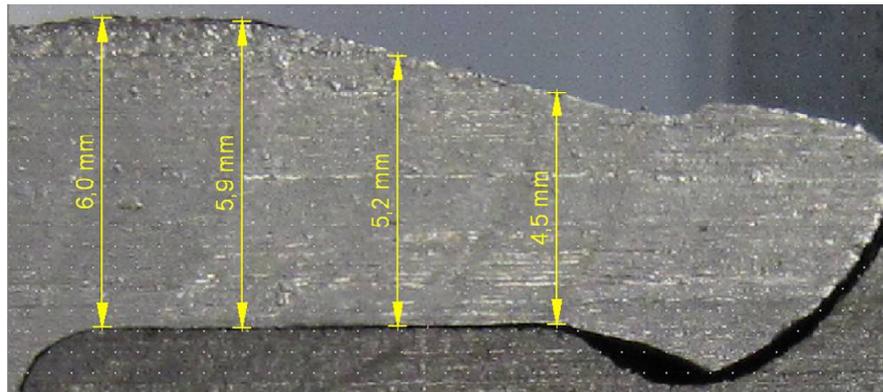


Abbildung 8.6: Wandstärke des Bremsscheibentopfes im Bereich der Verzahnung

Ein weiteres Gütekriterium der Verbindung stellt die im Prozess erreichbare Formfüllung der Verzahnung  $\varphi_V$  dar. Die Formfüllung beeinflusst die im Betrieb auftretende Flächenpressung und ist somit ein sicherheitsrelevantes Kriterium. Zu betrachten ist hierbei die Verzahnung zur Übertragung des Bremsmoments wie auch der Hinterschnitt, über den die axiale Sicherung realisiert ist. Abbildung 8.7 zeigt neben der Schnittansicht eines Prototyps den Ausschnitt eines umgeformten Aluminiumtopfes.

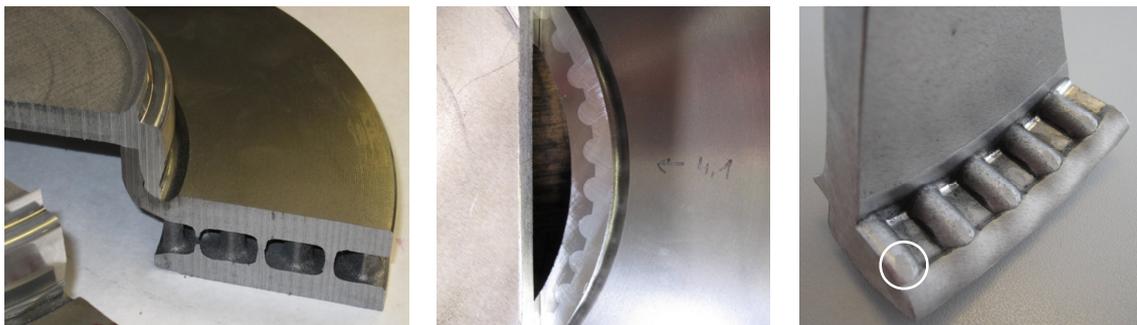


Abbildung 8.7: Umformend hergestellte Bremsscheibe – Schnittansicht und Formfüllung (links und Mitte), Verzahnung des Aluminiumtopfes (rechts)

Insgesamt beträgt die bei den Prototypen realisierte Formfüllung annähernd 100 %. Im Übergangsbereich zwischen Verzahnung und Hinterschnitt (vgl. exemplarische Markierung in Abbildung 8.7, rechts) ist eine leichte Abplattung zu erkennen, die auf eine nicht vollständige Formfüllung schließen lässt. Aufgrund der geringen Ausprägung wird kein Einfluss auf das Betriebsverhalten erwartet.

Hinsichtlich der Validierung des Fertigungsprozesses und der Prototypenqualität wird neben der Erfüllung der Geometrieanforderungen die Gefahr einer durch die Prozesskräfte bedingten Rissbildung im Vorfeld als besonders kritisch eingestuft. Die Anbindezone des Reibringkörpers übernimmt während des Umformprozesses die Funktion der Matrize und ist den Belastungen durch die Prozesskräfte ausgesetzt. Bedingt durch die lamellare Ausprägung des Graphits wird von einer Reduzierung der mechanischen Festigkeit im Reibringkörper sowie einer Spannungskonzentrationen an den Rändern ausgegangen. Verformungsfähigkeit und Schlagzähigkeit sind im Vergleich mit anderen

Gussorten somit geringer.<sup>215</sup> Um das Risiko einer Schädigung des Reibringkörpers zu minimieren, wird die Abstützung auf dem Dorn durch Anpassung der Dorngeometrie an die Innenkontur des Anbindungsbereichs optimiert. Die Prüfung der Prototypen auf Risse im Anbindungsbereich im Anschluss an den Umformprozess mittels Farbeindringverfahren und Röntgenstrahlen zeigt keinerlei Anzeichen von Rissen. Der Einfluss der Prozesskräfte wird für die vorliegende Geometrie somit als unkritisch bezüglich der Bildung von Rissen eingestuft.

Im Rahmen der Prototypfertigung konnte gezeigt werden, dass die Kombination der Verfahren Drücken und Drückwalzen die Realisierung einer Verbundbremsscheibe in sehr kurzer Zeit ermöglicht. Der reine Umformprozess der Aluminiumronde, bei dem Topfgeometrie und Anbindung realisiert werden, erfolgt innerhalb von etwa fünf Sekunden. Die endkonturnahe Fertigung und die hohe erreichbare Oberflächengüte ermöglichen eine Reduzierung des mechanischen Nachbearbeitungsumfangs auf die toleranzbehafteten Flächen. Eine Nachbearbeitung der Topfaußenkontur ist nicht mehr erforderlich. Im Vergleich zur einteiligen Grauguss-Bremsscheibe wurde mit diesem Konzept eine Massensparnis von etwa 350 g ( $\approx 4\%$ ) erreicht.

### 8.3 Ergebnisse der Validierungsversuche

Die Versuchsdurchführung erfolgt mit dem Ziel, die Festigkeit unter hohen mechanischen und thermischen Lasten nachzuweisen. Auf mechanischer Seite steht die sichere Übertragung des Bremsmoments unter thermomechanischer Last ohne ein vorzeitiges Versagen durch Rissbildung oder Bruch der Bremsscheibe im Vordergrund. Weiterhin ist das Verformungsverhalten (Schirmung) unter hoher Temperaturbelastung zu bewerten. Hierbei ist auch zu prüfen, in wie weit durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten Relativbewegungen zwischen Topf und Reibring auftreten.

Die Versuche zur Validierung der Prototypen werden an einem Schwungmassenprüfstand durchgeführt.<sup>216</sup> Die Vorteile sind neben der Darstellbarkeit beliebiger realer Lastzyklen vor allem die gute Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen (Strömungs- / Kühlverhältnisse, Bremsdruck/Bremsmoment) sowie die einfache Einbindung von Messtechnik.<sup>217,218</sup> Die Referenz für die durchgeführten Versuche bildet die eintei-

---

<sup>215</sup> Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 4*, 2006, S. 103

<sup>216</sup> Leistungsdaten des eingesetzten Schwungmassenprüfstands, vgl. Anhang 13.5.1, Tabelle 13.7

<sup>217</sup> Sardá, A. H.: *Wirkungskette der Entstehung von Hotspots und Heißrubbeln in Pkw-Scheibenbremsen*, 2009, S. 38 f.

<sup>218</sup> Olms, H.; Marschner, H.; Reuter, M.; Schiffner, K.; Bletz, M.; Weiss, D.: *Bremsentechnisches Versuchswesen*. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): *Bremsenhandbuch*, 2006, S. 439

lige Serienbremsscheibe (nachfolgend als Basis bezeichnet). Zur Untersuchung und Prüfung von Festigkeit und Funktion (thermisch und mechanisch) sowie der für jeden Prototyp spezifischen Validierungsumfänge werden Versuche mit verschiedenen Lastkollektiven durchgeführt, die nachfolgend aufgeführt sind. Die Versuchsparameter für alle Lastkollektive sind in Anhang 13.5.2 zusammengefasst.

- **Thermische Rissbeständigkeit:** Prüfung der Ermüdungsfestigkeit des Reibringkörpers unter zyklischer thermomechanischer Belastung bis zum Durchriss. Abbildung 8.8 zeigt schematisch einen Reibringausschnitt mit verschiedenen Rissausprägungen und den dazugehörigen Beschreibungen.

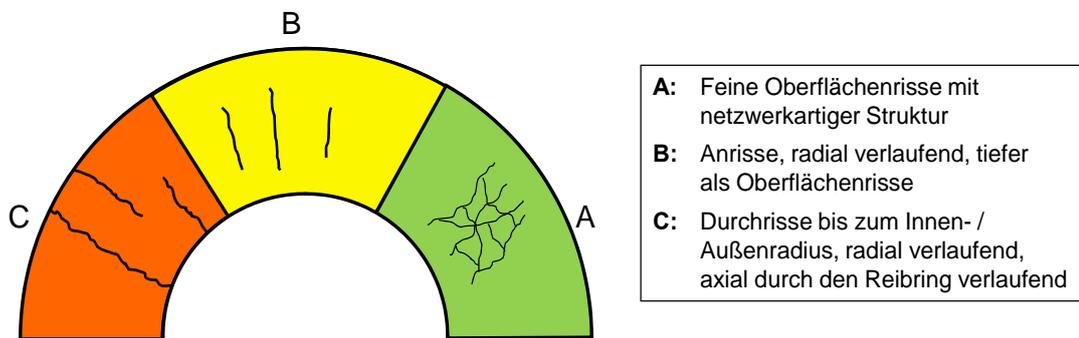


Abbildung 8.8: Schematische Darstellung verschiedener Formen der Rissausprägung bei Bremsscheiben

- **Überlastprüfung:** Prüfung der Spitztemperatur im Kühlkanal (Zielwert unter 500 °C), Prüfung auf Risse unter maximaler Belastung.
- **Fadingtest:** Prüfung der thermischen Leistungsfähigkeit der Bremsscheibe unter höchster thermischer Last.
- **Thermische Verformung (Schirmung):** Die Schirmung beschreibt die Differenz der axialen Verschiebung zwischen äußerem und innerem Reibringradius. Das Schirmungsverhalten ist eine wichtige Größe im Hinblick auf Funktion und Bremskomfort. Ausgeprägtes Schirmungsverhalten kann im Betrieb zu Schrägverschleiß und Restbremsmomenten als Folge einer Lüftspielreduzierung führen.<sup>219</sup> Bewertungsgrundlage sind die maximale Schirmung sowie die maximale Erhöhung der plastischen Planlaufabweichung. Die Prüfung erfolgt auf Basis verschiedener Lastkollektive zur Bewertung von Komfortbremsungen und Vollverzögerungen. Abbildung 8.9 zeigt die Messposition der eingesetzten Sensorik.

<sup>219</sup> Dreilich, L.; Pankau, J.; Schmelting, H.-J.: Analyse und Optimierung von Bremsscheibendeformationen unter Temperaturbelastung, 1992, S. 34

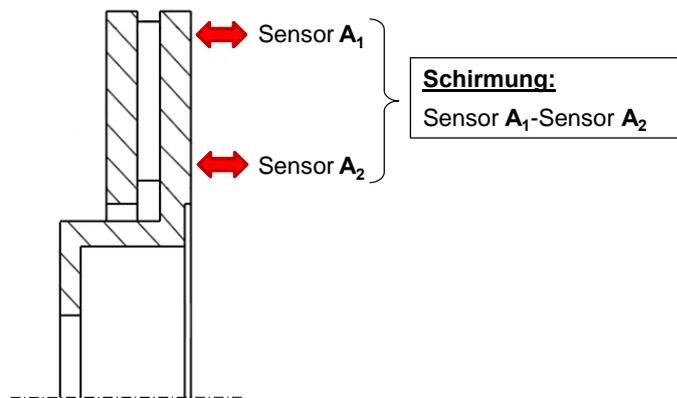


Abbildung 8.9: Abstandsmessung im Rahmen der Versuche zur thermischen Verformung

### 8.3.1 Mechanische Festigkeit und Rissbildung

Die Erprobung der Ermüdungsfestigkeit von Bremsscheiben ist Teil der Absicherung der Bauteilsicherheit. In der Praxis sind Bremsscheiben in der Regel zyklischen Belastungen durch aufeinanderfolgende Erwärmungs- und Abkühlungsphasen mit teilweise hohen Temperaturgradienten ausgesetzt. Die daraus resultierenden wechselnden Spannungszustände vor allem an der Oberfläche der Bremsscheibe als Ort des Energieeintrags führen über der Laufzeit zur Bildung von Rissen.<sup>220</sup> Die Ausbreitung der Risse kann durch weitere Belastung bis zum Durchriss der Bremsscheibe und somit zum vollständigen Bauteilversagen führen. Zur Prüfung des Ermüdungs- und Rissbildungsverhaltens werden die Versuche zur thermischen Rissbeständigkeit herangezogen.<sup>221</sup> Aufgrund der bis auf den Anbindungsbereich geometrischen und fertigungstechnischen Gleichheit des Reibringkörpers mit der Basis-Bremsscheibe ist ein ähnliches Rissbildungsverhalten zu erwarten. Die Schadensbilder der Versuche bestätigen diese Vermutung. Der Durchriss tritt am Außenradius der Reibringe auf, wobei sich die konstruktive Trennung von Reibringkörper und Bremsscheibentopf positiv auf die Sicherheit gegen Topfabrisse auswirkt.<sup>222</sup> Der Anbindungsbereich zeigt sich in der Verfolgung der Rissentstehung und Rissausbreitung insgesamt unauffällig. Abbildung 8.10 zeigt ein typisches Schadensbild der umformend hergestellten Leichtbau-Bremsscheibe nach bestandenen Rissprüfungsversuch.

---

<sup>220</sup> Yamabe, J.; Takagi, M.; Matsui, T.: Development of Disc Brake Rotors for Heavy- and Medium-Duty Trucks with High Thermal Fatigue Strength, 2003, S. 42 f.

<sup>221</sup> Versuchsparameter der verwendeten Prüf Szenarien, siehe Anhang 13.5.2

<sup>222</sup> Hoffmann, I.; Füllgrabe, F.; Winner, H.: Die Zukunft der Bremsscheibe im Umfeld des Leichtbaus, 2010, S. 54

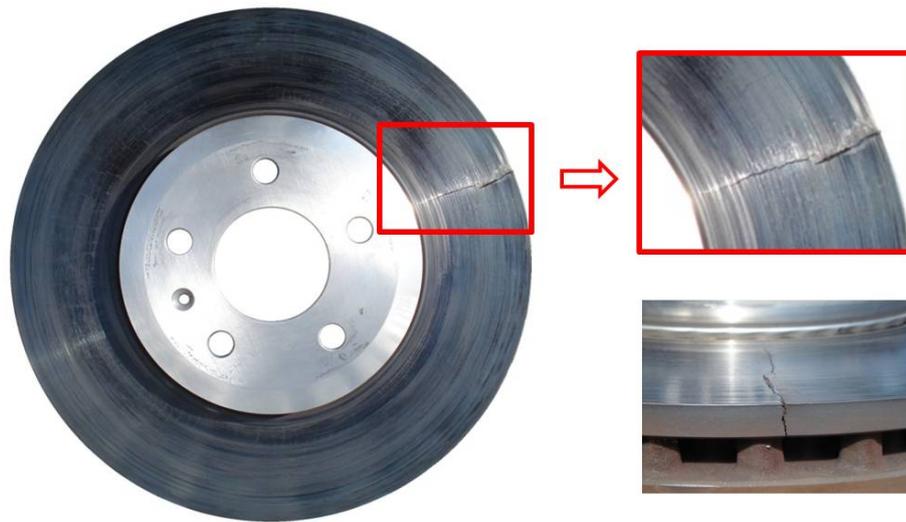


Abbildung 8.10: Schadensbild eines Rissprüfungstests der umformend hergestellten Leichtbau-Bremsscheibe

### 8.3.2 Thermisches Verhalten

Bedingt durch die gleiche Gestaltung der Reibringe und des Kühlkanals werden nur geringe Änderungen im thermischen Verhalten im Vergleich zur Basis-Bremsscheibe erwartet. Mögliche Unterschiede resultieren aus dem Wärmeübergang zwischen Reibringkörper und Bremsscheibentopf sowie der reduzierten Wärmekapazität des Topfes. Aufgrund des in Kapitel 6.2 gezeigten geringen Einflusses von Parameteränderungen im Topfbereich auf die thermische Leistungsfähigkeit wird eine geringe Temperaturerhöhung erwartet. Als Vergleichsgröße wird die Temperatur im Kühlkanal herangezogen. Im Vergleich zur Oberflächentemperatur, die bedingt durch Einflüsse wie Hotspotting oder Hotbanding radial und rotatorisch hohe Temperaturgradienten aufweisen kann, wird in der Scheibenmitte eine annähernd homogene Temperaturverteilung erwartet.

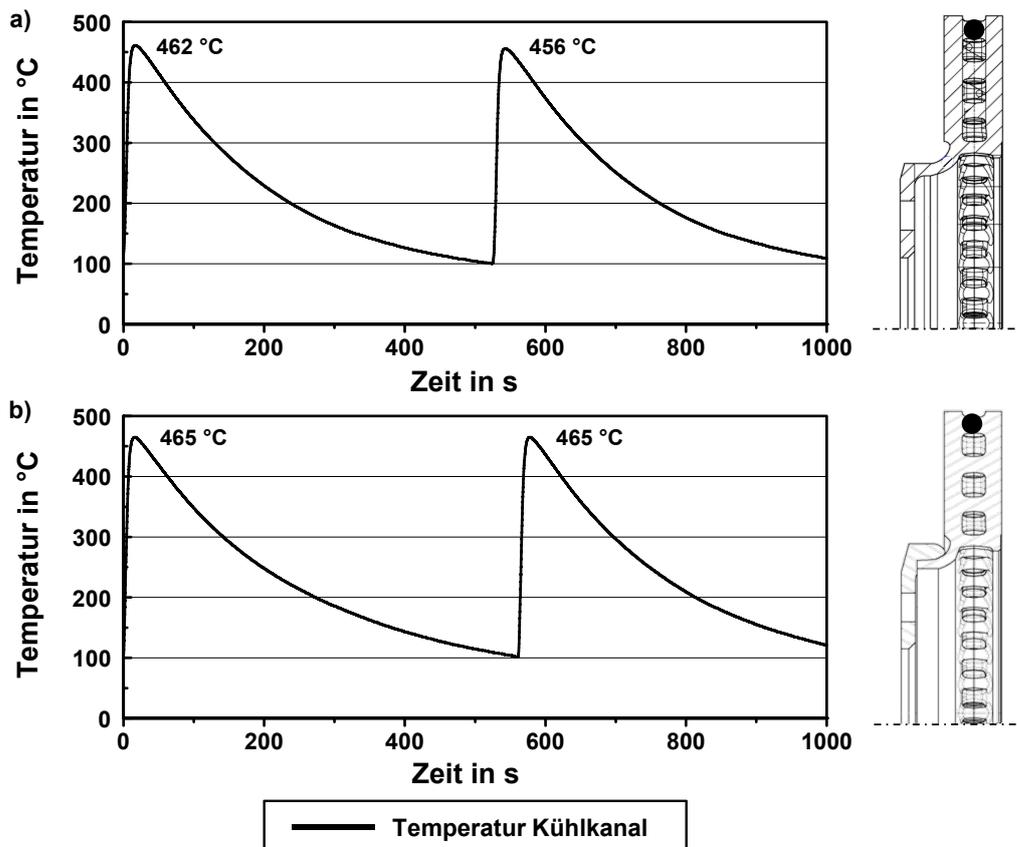


Abbildung 8.11: Vergleich der Temperaturen im Kühlkanal – a) Basis-Bremsscheibe, b) Umformend hergestellte Leichtbau-Bremsscheibe

Abbildung 8.11 zeigt die Temperaturverläufe des Kühlkanals und des Anbindungsbereichs für zwei Einzelbremsungen eines Überlasttests im Vergleich zwischen der Prototyp-Bremsscheibe (a) und der Basis-Bremsscheibe (b). Wie erwartet stellt sich eine annähernd gleiche Spitzentemperatur ein. Die gemessenen Maximaltemperaturen im Kühlkanal zeigen ein etwas geringeres Temperaturniveau ( $\Delta T \approx 3\text{--}9\text{ °C}$ ) für die einteilige Bremsscheibe, was im Rahmen des Fadingtests hinsichtlich möglicher Wärmeleitungseinflüsse untersucht worden ist. Die Ergebnisse des Fadingtests sind in Abbildung 8.12 dargestellt. Neben der Temperatur auf der Reibfläche werden die Temperaturen im Anbindungsbereich sowie im Topf aufgenommen, was eine Bewertung der Wärmeleitung ermöglicht. Die sich einstellenden Verharrungstemperaturen an der Reibringoberfläche der verglichenen Bremsscheiben zeigen nur minimale Unterschiede, so dass hier von einem gleichen Temperaturniveau ausgegangen wird. Deutlichere Unterschiede ergeben sich in der Anbindungszone sowie im Topfbereich. Das Temperaturniveau der Prototyp-Bremsscheibe ist in diesem Bereich etwa  $35\text{ °C}$  niedriger verglichen mit der Basis. Unter Berücksichtigung der für die Prototyp-Bremsscheibe erforderlichen geometrischen Anpassungen im Anbindungsbereich sowie dem potenziell höheren Widerstand im Übergang zwischen Anbindung und Topf wird auf einen schlechteren Wärmeübergang geschlossen.

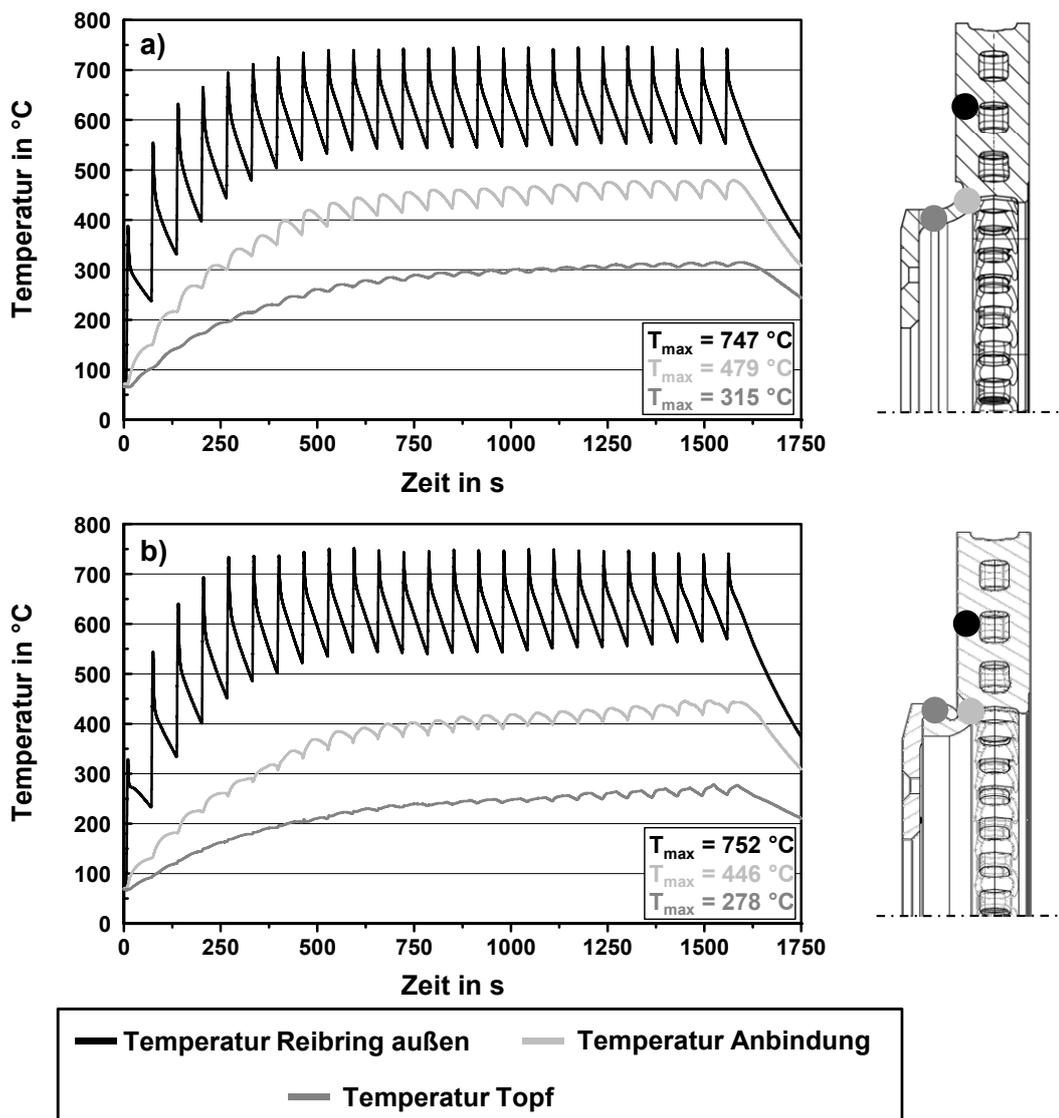


Abbildung 8.12: Vergleich der Temperaturen im Fadingtest – a) Basis-Bremsscheibe, b) Umformend hergestellte Leichtbau-Bremsscheibe

Neben der Analyse der thermischen Leistungsfähigkeit werden die geprüften Brems-scheiben nach den Versuchen auf ein mögliches Spiel zwischen Reibringkörper und Bremsscheibentopf untersucht. Bei einigen Prototyp-Bremsscheiben zeigt sich während der Überlastprüfung ein leichtes axiales Spiel zwischen Bremsscheibentopf und Reibringkörper im Zehntelmillimeter-Bereich. Ein weiteres Lockern des Topfes konnte ebenso wie mechanische Schäden durch Risse oder Verformungen im Versuchsverlauf nicht festgestellt werden. Als Ursache für das Auftreten von Spiel wird eine zu kleine axiale Sicherung identifiziert, deren Ausführung durch die vorhandenen Modelleinrichtungen zum Gießen vorgegeben war. Durch eine konstruktive Weiterentwicklung des

Konzepts wurde die Aufnahme höherer Axialkräfte ermöglicht und dadurch ein fester Topfsitz realisiert.<sup>223</sup>

### 8.3.3 Verformungsverhalten unter thermomechanischer Last

Die umformend hergestellte Leichtbau-Bremsscheibe weist eine ähnliche Anordnung von Reibringkörper und Topf auf, wie es bei der genieteten Verbundbremsscheibe (vgl. Abbildung 8.13) oder bei einteiligen Bremsscheiben der Fall ist.

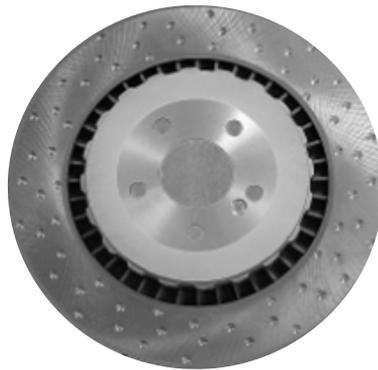


Abbildung 8.13: Verbundbremsscheibe mit Nietverbindung zwischen Reibringkörper und Topf

Aufgrund dieser konzeptionellen Parallelen wird ein ähnliches Verformungs- und Schirmungsverhalten erwartet. Mögliche Vorteile im Schirmungsverhalten der umformend hergestellten Bremsscheibe ergeben sich aus der geringeren Steifigkeit des Aluminiumtopfes verglichen mit dem Graugusstopf der Basis-Scheibe. Ein entsprechendes Verhalten wird bei der genieteten Bremsscheibe beobachtet.<sup>224</sup> Abbildung 9.14 zeigt die Verformungswerte für den Einzel- und Doppelstopp der Schirmungsuntersuchung.

---

<sup>223</sup> Hoffmann, I.; Füllgrabe, F.; Winner, H.: Die Zukunft der Bremsscheibe im Umfeld des Leichtbaus, 2010, S. 57

<sup>224</sup> Hoffmann, I.; Füllgrabe, F.; Winner, H.: Die Zukunft der Bremsscheibe im Umfeld des Leichtbaus, 2010, S. 55 f.

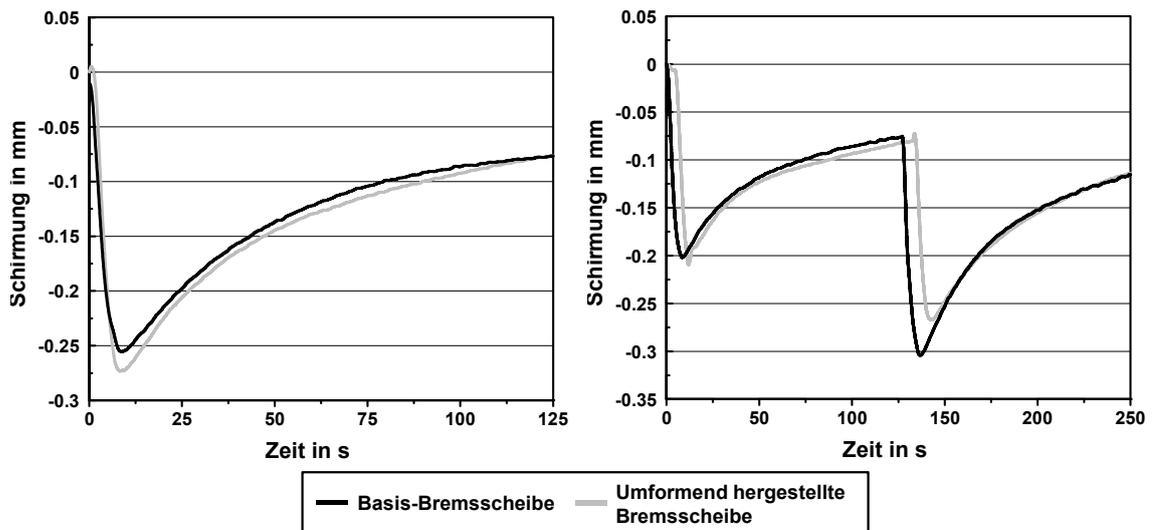


Abbildung 8.14: Thermische Verformung der Basis-Bremsscheibe und umformend hergestellten Bremsscheibe im Einzelstopp (links) und Doppelstopp (rechts)

Die Versuchsergebnisse bestätigen das im Vorfeld erwartete Verformungsverhalten. Die Prototyp-Bremsscheibe zeigt im Vergleich mit der Basis-Bremsscheibe ein nahezu gleiches quantitatives und qualitatives Verformungsergebnis sowohl im Einzel- als auch im Doppelstopp.

## 8.4 Fazit und Potenzial für weiterführende Untersuchungen

Durch die Kombination der umformenden Fertigungsverfahren Drücken und Drückwalzen wird eine Leichtbau-Bremsscheibe in Verbundbauweise realisiert, die sich vor allem durch einen vereinfachten Fertigungsprozess im Vergleich zu bisherigen Konzepten auszeichnet. Die Integration des Anbindungsprozesses in die Topfherstellung führt zu einer erheblichen Reduzierung der Prozessschritte.<sup>225</sup> Darüber hinaus bietet die hohe erreichbare Oberflächenqualität die Möglichkeit, den Nachbearbeitungsaufwand zu reduzieren. Die resultierende Reduzierung der Fertigungszeiten in Verbindung mit der einfachen Werkzeuggeometrie stellen Potenziale für eine kostengünstige Umsetzung dar. Im Vergleich zur Basis-Bremsscheibe beträgt die Massensparnis etwa 350 g ( $\approx 4\%$ ). Konzeptbedingt hängt die realisierbare Massensparnis vor allem von der Topftiefe und der Größe des Verzahnungsbereichs ab, in dem eine Materialdopplung vorliegt.

<sup>225</sup> Vgl. vereinfachtes Prozessdiagramm in Anhang 13.6, Abbildung 13.16

In den Validierungsversuchen hat sich die umformend hergestellte Bremsscheibe im Hinblick auf die mechanische und thermische Festigkeit bewährt. Die Spitzentemperaturen und die Verformungen liegen auf dem Niveau der einteiligen Basis-Bremsscheibe. Ein vorzeitiges Versagen durch Rissbildung konnte in den Versuchen nicht beobachtet werden. Im Hinblick auf die Langzeitstabilität ist eine Schädigung durch galvanische Korrosion zu untersuchen. Die Bremsscheibengeometrie ermöglicht im Bereich der Anbindungszone sowie im Innenteil des Reibringkörpers Wasseransammlungen (vgl. Abbildung 8.15), womit eine wesentliche Bedingung für die Entstehung galvanischer Korrosion erfüllt ist. Entsprechende Schadensfälle bei in Serie befindlichen Konzepten, wie der Niet-Bremsscheibe, sind dem Autor nicht bekannt.

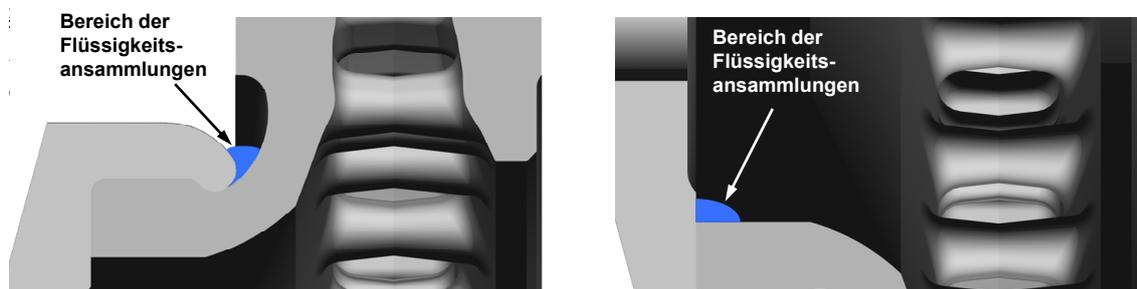


Abbildung 8.15: Potenziell gefährdete Bereiche für Kontaktkorrosion der umformend hergestellten Leichtbau-Bremsscheibe

Eine potenzielle Weiterentwicklung des Konzepts der umformend hergestellten Bremsscheibe ist die Anbindung des Bremsscheibentopfes über eine innen liegende Verzahnung. Das aktuell umgesetzte Konzept ermöglicht eine freie Ausdehnung des Aluminiumtopfes in radialer Richtung. Eine innenliegende Verzahnung bietet die Möglichkeit die radiale Ausdehnung des Topfes zu verhindern. Somit kann von einer selbstverstärkenden Wirkung in radialer Richtung ausgegangen werden, die einem Lösen von Bremsscheibentopf und Reibringkörper entgegenwirkt. Aus fertigungstechnischer Sicht ist die Eignung einer Verfahrenskombination aus Innenprojizieren und Drücken zu prüfen,<sup>226</sup> bei der ebenfalls Walzen als formgebende Werkzeuge zum Einsatz kommen.

---

<sup>226</sup> Runge, M.: Drücken und Drückwalzen, 1993, S. 25 f.

## 9 Reibgeschweißte Leichtbau-Bremsscheibe

### 9.1 Grundlagen des Reibschweißens

Das Reibschweißen gehört zu der Gruppe der Pressschweißverfahren, die entsprechend der DIN 8593 den fügenden Fertigungsverfahren zuzuordnen sind. Im Vergleich zu den klassischen Schmelzschweißverfahren zeichnet sich das Reibschweißen durch eine geringere thermische Belastung der Werkstoffe aus. Diese Eigenschaft bietet die Möglichkeit Werkstoffe mit stark unterschiedlichen Schmelztemperaturen zu verbinden, die mit herkömmlichen Schweißverfahren nicht oder nur schwer schweißbar sind (z.B. Aluminium / Stahl).<sup>227</sup> Nachteilig bei der Verschweißung von Werkstoffkombinationen ist die Gefahr der Entstehung intermetallischer Phasen in der Verbindungszone.<sup>228</sup> Diese führen zu einer Versprödung im Bereich der Schweißzone,<sup>229</sup> was sich negativ auf die Güte der Verbindung auswirkt.

Prozessseitig liegt der charakteristische Unterschied zu den Schmelzschweißverfahren in der Art der Wärmeeinbringung. Die erforderliche Wärme für die Verbindungsbildung wird beim Reibschweißen ausschließlich durch mechanische Reibung erzeugt. Hierzu werden die zu fügenden Bauteile an den Stoßstellen gegeneinander bewegt. In der Regel wird mindestens ein Fügepart in ein drehendes Spannwerkzeug gespannt, während der Fügepartner feststeht und sich in axialer Richtung verfahren lässt.<sup>230</sup> Durch die Relativbewegungen zwischen beiden Bauteilen und der wirkenden Axialkraft steigt die Temperatur in der Kontaktzone. Bei Erreichen der Fügepartner Temperatur, die unterhalb der Schmelztemperatur der Werkstoffe liegt, wird der Reibvorgang durch abruptes Abbremsen des rotierenden Bauteils beendet und die Stauchkraft erhöht. Als Folge der Materialaufweichung entsteht während des Stauchvorgangs der für das Reibschweißen typische Wulst, der bei Bedarf durch spanende Nachbearbeitung entfernt wird.

---

<sup>227</sup> Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1, 2006, S. 126 f.

<sup>228</sup> Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1, 2006, S. 127

<sup>229</sup> Fahrenwaldt, H. J.; Schuler, V.: Praxiswissen Schweißtechnik, 2006, S. 107, S. 208, S. 362

<sup>230</sup> Witt, G. et al: Taschenbuch der Fertigungstechnik, S. 205, 2006

Abbildung 9.1 zeigt schematisch die Phasen des Reibschweißprozesses mit den relevanten Prozessgrößen. Deutlich erkennbar ist die stetige Längenverkürzung, die bedingt durch den sprunghaften Anstieg der Stauchkraft am Ende des Prozesses (Phase d) nochmals deutlich zunimmt.

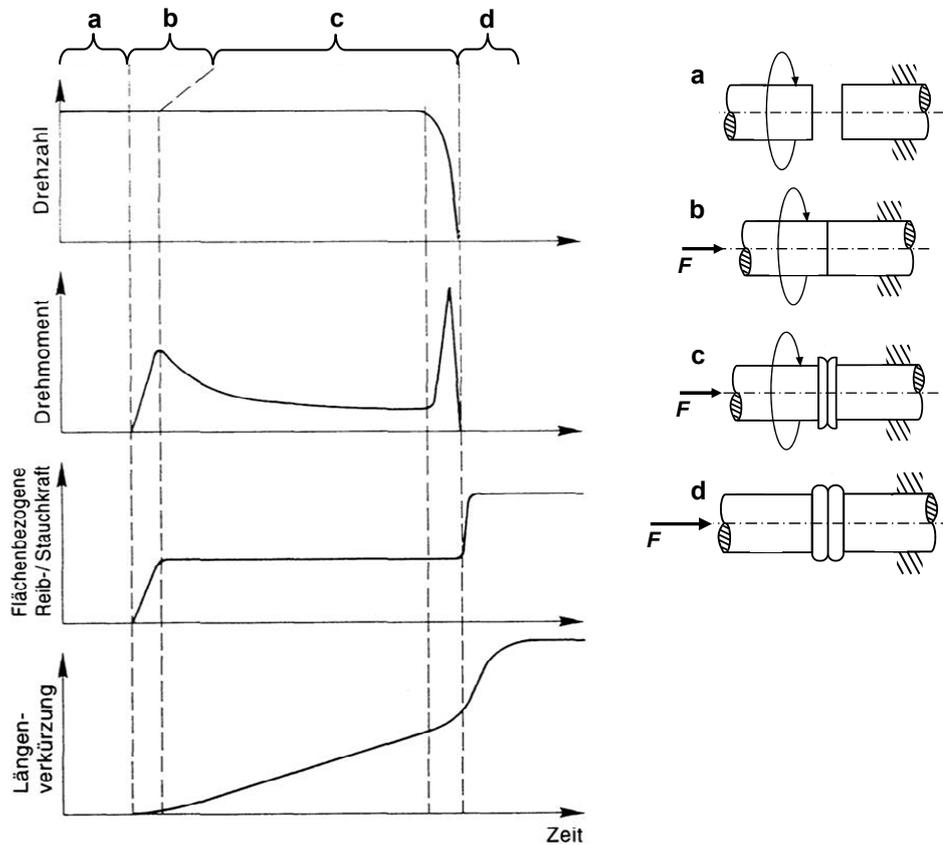


Abbildung 9.1: Reibschweißprozess – Schematische Darstellung der zeitlichen Verläufe der relevanten Prozessgrößen<sup>231</sup>

## 9.2 Prototypische Umsetzung

Die Grundidee der reibgeschweißten Bremsscheibe basiert auf der Senkung der Bauteilmasse mit dem Ziel die thermische Leistungsfähigkeit zu verbessern. Hierzu wird ein Zwischenelement zur Erhöhung der wirksamen Kühlfläche formschlüssig in den Kühlkanal des Reibringkörpers integriert. Gleichzeitig erfolgt über das Element die Anbindung an den Leichtbautopf aus Aluminium. Abbildung 9.2 zeigt Konzeptdarstellungen der Bremsscheibe, in denen die Anbindungszone den Bereich der Wulstbildung und der auftretenden intermetallischen Phasen kennzeichnet.

<sup>231</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an: Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1, 2006, S. 122

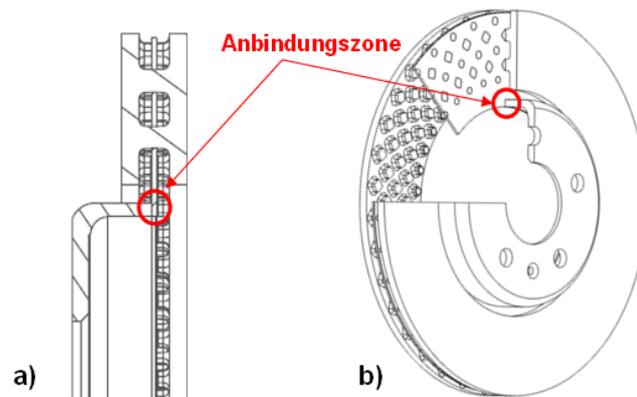


Abbildung 9.2: Schnitansichten der reibgeschweißten Bremsscheibe

## 9.2.1 Konzeptauslegung

Aus der Konzeptidee resultieren sowohl funktionale als auch fertigungstechnische Herausforderungen, die im Rahmen der Umsetzung zu berücksichtigen sind. Durch die Gestaltung des Zwischenelements und der Anbindung an den Topf sind neben einer Änderung der thermischen Eigenschaften auch Einflüsse auf das Verformungsverhalten unter thermomechanischer Last zu erwarten. Weiterhin ist die Stabilität der Reibschweißverbindung im Betrieb zu prüfen. Weitere fertigungstechnische Herausforderungen ergeben sich aus der Integration des Zwischenelements in den Kühlkanal sowie einer reibschweißgeeigneten Gestaltung der Anbindungszone.

### 9.2.1.1 Werkstofftechnische Randbedingungen

Im Hinblick auf die Reibschweißbeignung spielt die Werkstoffauswahl der Reibschweißpartner eine wesentliche Rolle. Eine Übersicht über die Reibschweißbeignung gibt die DIN EN ISO 15620.<sup>232</sup> Die Ausführung des Zwischenelements in Grauguss analog zum Reibringkörperwerkstoff wird hinsichtlich der Festigkeit der Verbindung als kritisch bewertet und nicht weiterverfolgt.<sup>233</sup> Für das im Kühlkanal integrierte Zwischenelement, über welches auch die Anbindung realisiert wird, wird ein Blech aus höherfestem Stahl (S335MC) mit einem maximalen Kohlenstoffgehalt von 0,12 % gewählt. Die Temperaturstabilität des Stahlblechs ermöglicht eine gute Einbindung in die Prozesskette, da das Blech direkt in den Gusskern integriert werden kann. Gleichzeitig wird im Hinblick auf die thermische Funktion von einer ausreichenden thermischen Stabilität des verwendeten Stahls ausgegangen. Für den Bremsscheibentopf wird die Aluminiumknetlegierung AlMg3 gewählt.

<sup>232</sup> DIN EN ISO 15620: Schweißen – Reibschweißen von metallischen Werkstoffen, 2000

<sup>233</sup> Füllgrabe, F.; Winner, H.; Kiefer, A.; Fischer, S.; Hoffmann, I.: Simulative Analysis and Experimental Investigation of Innovative Lightweight Brake Discs, 2010, S. 287

Zu beachten sind die beim thermischen Fügen von Aluminium und Stahl entstehenden intermetallischen Phasen, die zu einer Versprödung der Fügezone führen. Der Anbindebereich ist somit besonders im Hinblick auf Bauteilversagen durch Rissbildung oder Sprödbruch zu beachten. In diesem Zusammenhang ist auch das Wachstum des Phasensaums im Betrieb unter Temperatureinfluss zu berücksichtigen. Nach ersten Erkenntnissen wird eine Grenztemperatur in der Fügezone im Betrieb von 180 bis 200 °C festgelegt.<sup>234,235</sup> Eine detaillierte Analyse des Einflusses und der Auswirkungen der intermetallischen Phase ist im Rahmen der Validierungsversuche erforderlich.

### 9.2.1.2 Geometrische Randbedingungen

Für das zu realisierende Konzept einer reibgeschweißten Leichtbau-Bremsscheibe sind aufbauend auf der Basis-Bremsscheibe die nachfolgend beschriebenen Geometrieänderungen erforderlich.

#### Reibringkörper mit Funktionsblech

Die Gestaltung des Reibringkörpers erfolgt mit dem Ziel einer im Vergleich zur Basis gleichbleibenden Reibpfadhöhe und Reibringkörperbreite. Bedingt durch die Einbindung des Funktionselementes in den Kühlkanal werden Anpassungen bezüglich der Reibring- und Kühlkanalbreite vorgenommen. In Abbildung 9.3 sind die Änderungen anhand von Schnittansichten der einteiligen Basis-Bremsscheibe sowie des Reibschweiß-Konzepts dargestellt.

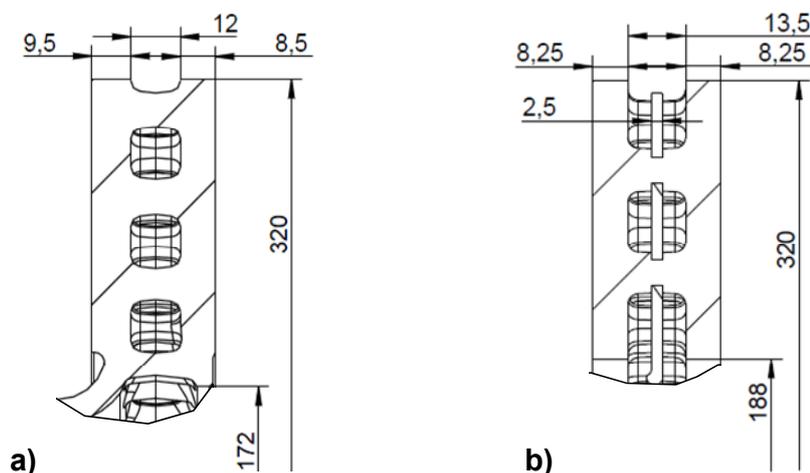


Abbildung 9.3: Schnittansicht mit Reibringkörperabmessungen für die einteilige Basis-Bremsscheibe (a) und das Konzept der reibgeschweißten Bremsscheibe (b)

---

<sup>234</sup> Füllgrabe, F.; Winner, H.; Kiefer, A.; Fischer, S.; Hoffmann, I.: Simulative Analysis and Experimental Investigation of Innovative Lightweight Brake Discs, 2010, S. 287

<sup>235</sup> Hoffmann, I.; Füllgrabe, F.; Winner, H.: Die Zukunft der Bremsscheibe im Umfeld des Leichtbaus, 2010, S. 51

Die Anforderung einer zur Basis gleichbleibenden Breite des Reibringkörpers erfordert die Reduzierung der Reibring- und Kühlkanalabmessungen, um den erforderlichen Bauraum für das Funktionsblech zu schaffen. Für das Konzept der reibgeschweißten Bremsscheibe erfolgt eine Reibringvereinheitlichung bei gleichzeitiger Reduzierung der Gesamtbreite beider Reibringe um 1,5 mm. Die Reduzierung der wirksamen Kühlkanalbreite beträgt im Vergleich zur Basis 1 mm.

Die Ausschnitte für die Kühlnoppen werden über einen Laserprozess in das Stahlblech eingebracht. Über einen Drehprozess erfolgt die Herstellung der Außen- und Innenkontur des Anbindungsblechs. Bei der Dimensionierung des Funktionsblechs sind fertigungstechnische wie auch funktionale Anforderungen zu berücksichtigen. Aus fertigungstechnischen Gründen wird zunächst eine Blechdicke von 2,5 mm festgelegt, um die Gefahr einer thermisch bedingten Verformung im Rahmen des Gießprozesses zu reduzieren. Im Bereich der Topfanbindung ist eine Aufdickung des Funktionsblechs erforderlich. Diese wird für den im Vorfeld des Reibschweißprozesses erforderlichen Plandrehvorgang als Materialvorhalt benötigt (vgl. Abbildung 9.5). Auf funktionaler Seite ist die Wärmeleitung in die Anbindungszone gering zu halten, um ein Überschreiten der Grenztemperatur und damit eine Schwächung der Anbindung zu vermeiden. Durch Variation der Blechdicke wird die Wärmeleitung in den Topfbereich und somit auch die Temperaturverteilung in der Bremsscheibe beeinflusst. Den aus Gleichung (9.1) resultierenden Zusammenhang zwischen der Wandstärke  $s_{Blech}$  des Funktionsblechs und dem Wärmeleitwiderstand  $R$  zeigt Abbildung 9.4. Im Rahmen der Konzeptvalidierung sind mögliche thermische Auswirkungen durch die geometrischen Änderungen zu prüfen.

$$R = \frac{\ln \frac{r_{Blech,innen}}{r_{Blech,außen}}}{\lambda \cdot 2\pi \cdot s_{Blech}} \quad (9.1)$$

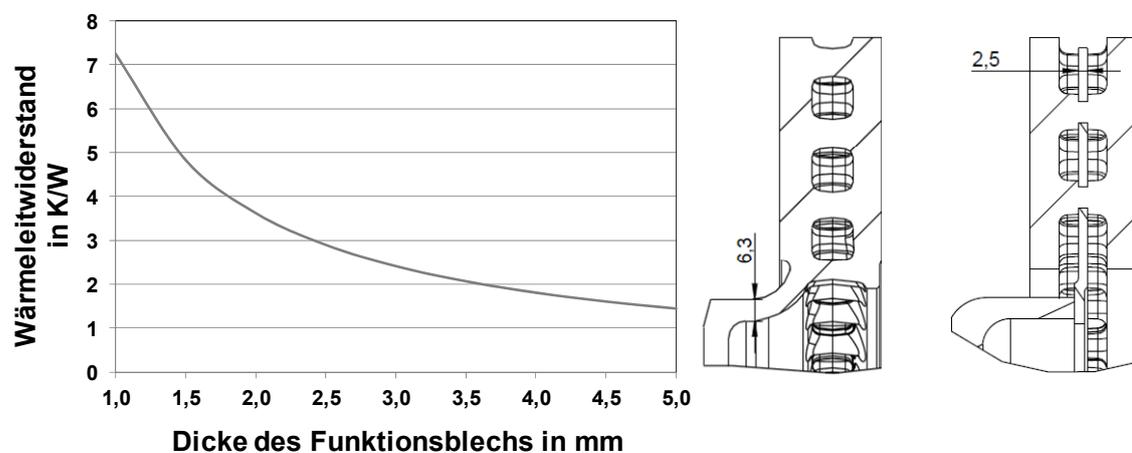


Abbildung 9.4: Wärmeleitwiderstand in Abhängigkeit der Dicke des Funktionsblechs

### Bremsscheibentopf

Analog zur Auslegung des Bremsscheibentopfes für die umformend hergestellte Brems-scheibe ist das maximal auftretende Bremsmoment von 3700 Nm relevant für die Di-mensionierung der Wandstärken. Weitere Randbedingungen ergeben sich aus der zuläs-sigen Gesamtbreite der Bremsscheibe (52,4 mm) sowie den Abmessungen des Reibringkörpers mit Funktionsblech. Weitere für die Auslegung relevante Einflüsse resultieren aus der prozessbedingten Verkürzung der Mantelfläche und der Entfestigung der Aluminiumlegierung im Anbindungsbereich. Beide Größen sind im Vorfeld nicht bekannt, was eine detaillierte Auslegung erschwert. Ausgehend von den Erfahrungen im Rahmen der Topfauslegung für die umformend hergestellte Bremsscheibe wird zunächst eine Topfwandstärke von 6 mm bei einem Außendurchmesser von 172 mm definiert (vgl. Abbildung 9.5).

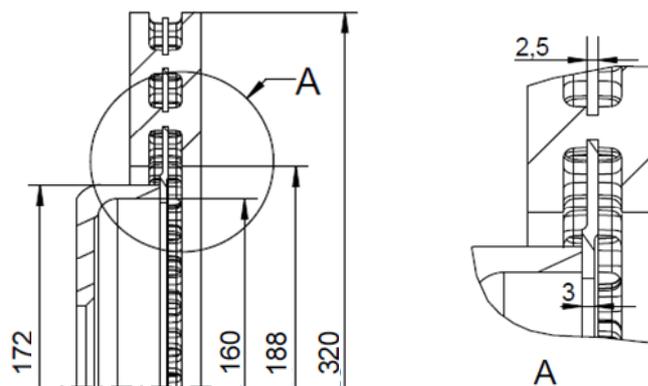


Abbildung 9.5: Radiale Abmessungen der reibgeschweißten Bremsscheibe (links) und Detailabmessungen des Funktionsblechs (rechts)

## 9.2.2 Prototypenfertigung<sup>236</sup>

Basierend auf dem in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Design der reibgeschweißten Bremsscheibe werden im folgenden Kapitel die fertigungstechnische Umsetzung sowie die Ergebnisse diskutiert. Eine stark vereinfachte schematische Übersicht über die Phasen des Reibschweißprozesses für die Bremsscheibe zeigt Abbildung 9.6. Der Reibringkörper wird am Außenradius für den Prozess in ein Spindelspannfutter mit drei Backen gespannt. Zur Aufnahme der im Prozess auf das Funktionsblech wirkenden Axialkräfte, ist in das Futter eine zusätzliche Abstützplatte integriert, an der das Blech anliegt.

---

<sup>236</sup> Die Fertigung der Prototypen erfolgte bei Fa. KUKA, Augsburg.

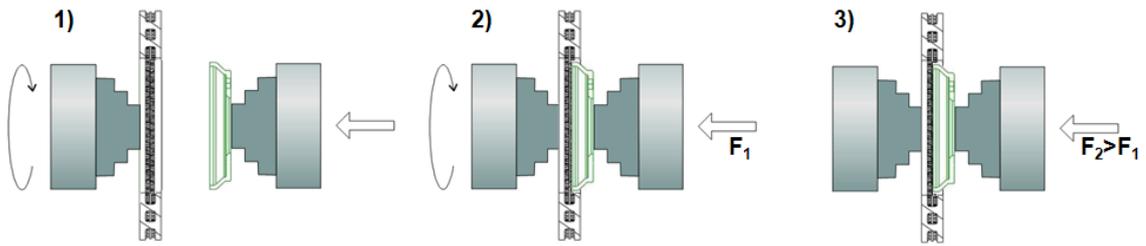


Abbildung 9.6: Schematische Darstellung des Reibschweißprozesses für die zu realisierende Leichtbau-Bremsscheibe

Der Bremsscheibentopf wird auf der Gegenseite in einem axial verfahrbaren Schlitten eingespannt. Die äußere Mantelfläche des Topfes wird über zwei Halbschalen fixiert und geführt. Dabei umschließen die Halbschalen nicht die komplette Länge der Topfmantelfläche. Der axiale Überstand des Topfes wird als Ausspannlänge bezeichnet und ist hinsichtlich der Gefahr eines Aufbeulens des Topfmaterials während des Prozesses möglichst gering zu halten. Die erforderliche Mindest-Ausspannlänge resultiert aus der Längenverkürzung als Folge der auftretenden Stauchkräfte am Prozessende sowie der Bauraumsituation an der Fügestelle.

Zu den relevanten Variationsparametern, die eine Beeinflussung des Reibschweißprozesses und damit der Bremsscheibe ermöglichen, zählen unter anderem Spindeldrehzahl sowie Reib- und Stauchdruck. Der Reibdruck wirkt am Ende der Reibphase und wird nach dem Stillstand der Spindel auf den Stauchdruck erhöht (vgl. Abbildung 9.1, S. 106). Eine weitere Variationsgröße stellt die resultierende Prozesszeit dar. Das Reibschweißen von Stahl und Aluminium erfordert zur Vermeidung einer Entfestigung der Aluminiumlegierung sehr kurze Prozesszeiten. Hierbei sind zwei Aspekte von besonderer Bedeutung. Die im vorliegenden Anwendungsfall aus dem Topfdurchmesser resultierenden hohen Relativgeschwindigkeiten in der Schweißebene führen zu einem schnellen Temperaturanstieg in der Fügezone. In Verbindung mit der vergleichsweise hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium steigt der Bereich der Wärmeeinflusszone. Durch eine Reduzierung der Prozesszeit kann dieser Bereich verkleinert werden, was einer Entfestigung entgegenwirkt. Darüber hinaus wirkt sich eine kurze Prozesszeit positiv auf die Größe der entstehenden intermetallischen Phasen aus. Mit zunehmender Reibzeit nimmt die Größe der intermetallischen Phase zu, was sich negativ auf die Bauteilfestigkeit auswirken kann. Für die Fertigung der Bremsscheibe sind mit Prozesszeiten unter 0,5 Sekunden die besten Ergebnisse erzielt worden.

Die Bewertung der Schweißverbindung erfolgt mit einer Biegeprüfung in Anlehnung an die DIN EN ISO 15620. Mit Hilfe der Ergebnisse können Aussagen über die Qualität der Reibschweißverbindung vorgenommen und Rückschlüsse auf die Schweißparameter gezogen werden. Für die Anfertigung der Prüfstücke wird das Funktionsblech oberhalb der Fügestelle vom Reibringkörper getrennt. Topfseitig wird die Stirnfläche mit einem Teil der Mantelfläche abgetrennt. Durch Sägeschnitte in die verbleibende Topfmantel-

fläche werden im Abstand von  $90^\circ$  vier Prüfstücke erstellt, die durch Schlagbelastung vom Funktionsblech getrennt werden. Abbildung 9.7 zeigt exemplarisch ein Prüfergebnis. Deutlich an den Prüfstücken zu erkennen ist der während der Stauchphase durch Materialverdrängung entstehende Wulst. Die aus der Stauchung resultierende Materialverkürzung liegt bei etwa 4 mm. Der rechte Teil der Abbildung zeigt eine Detailaufnahme des weißlich schimmernden Phasensaums, der gleichmäßig ausgebildet vorliegt.



Abbildung 9.7: Ergebnisse der Biegeprüfung – Prüfling mit Probestücken (links) und Detailaufnahme des entstandenen Phasensaums (rechts)

Die im Vorfeld erwarteten Prozessvorteile einer sehr guten Reproduzierbarkeit und kurzer Prozesszeiten konnten während der Prototypenfertigung bestätigt werden. Gleichzeitig stellt das Fertigungsverfahren, bedingt durch die dünne intermetallische Verbindungszone, hohe Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit. Insbesondere die Lage des Funktionsblechs im Reibringkörper ist hierbei von Bedeutung. Ein Bremssegment eines gefertigten Prototyps ist in Abbildung 9.8 dargestellt. Die erreichbare Massenersparnis der Prototyp-Bremsscheiben liegt bei etwa 950 g ( $\approx 10\%$ ).



Abbildung 9.8: Segment der reibgeschweißten Leichtbau-Bremsscheibe

### 9.3 Ergebnisse der Validierungsversuche

Im Fokus der durchgeführten Versuche stehen die Überprüfung der Reibschweißverbindung sowie die Analyse der Auswirkungen des Funktionsblechs auf das thermische und thermomechanische Verhalten der Bremsscheibe. Die Prüfkriterien für die Reibschweiß-

Verbindungen zwischen Topf und Reibringkörper resultieren aus der Übertragung des maximalen Bremsmoments sowie dem als kritisch bewerteten Temperatureinfluss auf die Festigkeit der Verbindung. Weiterhin ist der Einfluss des Funktionsblechs auf den Thermohaushalt der Bremsscheibe sowie auf das Verformungsverhalten unter thermo-mechanischer Last zu prüfen. Die Validierungsversuche erfolgen analog zu den Untersuchungen der umformend hergestellten Leichtbau-Bremsscheibe am Schwungmassenprüfstand (vgl. Kapitel 8.3).

### 9.3.1 Mechanische Festigkeit und Rissbildung

Für die Überprüfung der mechanischen Festigkeit und des Rissbildungsverhaltens wird das Lastkollektiv zur thermischen Rissbeständigkeit herangezogen.<sup>237</sup> Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zeigen, dass es im Bereich der Anbindung zwischen Funktionsblech und Bremsscheibentopf zu keinen Schädigungen durch Risse kommt. Das Versagenskriterium in Form des Durchrisses wird an den Reibringen erreicht. Abbildung 9.9 zeigt eine reibgeschweißte Prototyp-Bremsscheibe nach einer Rissprüfung.



Abbildung 9.9: Ergebnisse des Rissprüfungstests einer reibgeschweißten Bremsscheibe

Deutlich zu erkennen ist der Durchriss am Außenradius beider Reibringe. Vorteile im Rissbildungsverhalten ergeben sich durch das in den Kühlkanal integrierte Funktionsblech. Dieses weist nach den Versuchen keine oder nur geringe Rissmerkmale auf und trägt nach dem Durchriss zu einer Stabilisierung des Grundkörpers bei. Ein weiterer positiver Effekt resultiert aus der zentralen Anbindung des Reibringkörpers. Diese führt im Betrieb zu einem niedrigeren Belastungsniveau durch geringere thermomechanische Spannungen in den Reibringen.<sup>238</sup>

<sup>237</sup> Versuchsparameter der verwendeten Prüfzenarien, siehe Anhang 13.5.2, Tabelle 13.9

<sup>238</sup> Schorn, M.: Produkt- und Prozessinnovation von Grauguss-Bremsscheiben, 2006, S. 4

### 9.3.2 Thermisches Verhalten

Ausgehend von der thermischen Analyse der gesamten Bremsscheibe erfolgt im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen eine Detailanalyse zum thermischen Einfluss des Funktionsblechs. Vorteile sind durch die größere wirksame Kühlfläche zu erwarten, was insbesondere für den konvektiven Wärmetransport von Bedeutung ist. Gleichzeitig steigt bedingt durch die dünne Ausführung der Wärmeleitwiderstand, was einen Einfluss auf die Wärmeleitung in den Topf erwarten lässt.

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt liegt auf der thermischen Belastung des Anbindungsbereichs. Das Wachstum der intermetallischen Phase als Folge hoher thermischer Belastung im Bereich von 200 °C und einer daraus resultierenden Versprödung ist im Vorfeld der Versuche hinsichtlich der Bildung von Rissen als kritisch eingestuft worden. In Rissbildungsversuchen sind keine Thermoelemente in den Bereich der Anbindung zwischen Funktionsblech und Topf eingebracht worden. Daher wird trotz der positiven Versuchsergebnisse zum Rissbildungsverhalten ein möglicher Zusammenhang zwischen dem Temperaturniveau in der Anbindungszone und der Bildung von Rissen geprüft. Die Analyse erfolgt auf Basis von High-Performance Tests sowie einer thermischen Überlastprüfung.

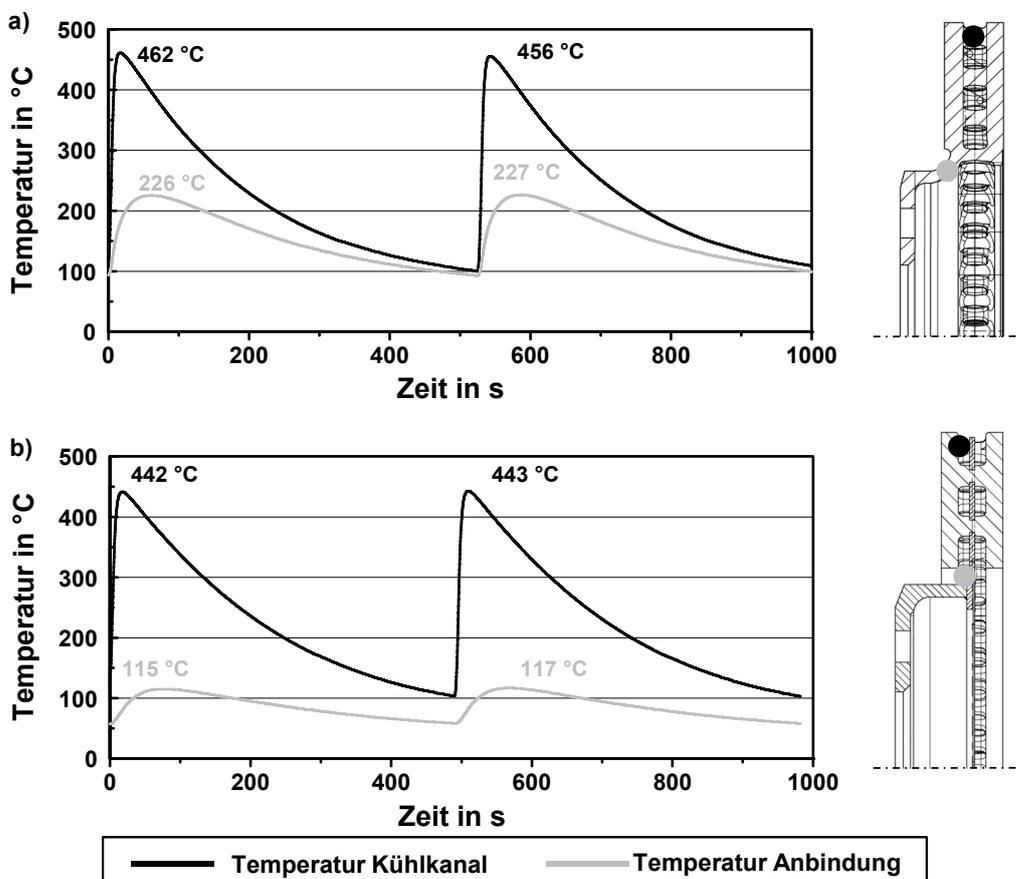


Abbildung 9.10: Vergleich der Temperaturen im Kühlkanal und in der Anbindungszone (rechts Lage der Thermoelemente) – a) Basis-Bremsscheibe, b) Reibgeschweißte Bremsscheibe

Abbildung 9.10 zeigt die Temperaturverläufe des Kühlkanals und des Anbindungsbereichs einer einteiligen Basis-Bremsscheibe (a) im Vergleich mit einer reibgeschweißten Bremsscheibe (b) für zwei Einzelbremsungen eines High-Performance Tests. Die auftretenden Maximaltemperaturen im Kühlkanal zeigen ein etwas geringeres Temperaturniveau ( $\approx 10\text{--}20\text{ °C}$ ) für die reibgeschweißte Bremsscheibe. Deutliche Unterschiede zeigen sich erwartungsgemäß in den Temperaturen der Anbindungszone. An vergleichbarer Messposition (vgl. Abbildung 9.10, rechts) ist das Temperaturniveau der Reibschweiß-Bremsscheibe um etwa  $110\text{ °C}$  niedriger als bei der Basis, was im Hinblick auf den thermisch begrenzt belastbaren Anbindungsbereich positiv zu bewerten ist.

Zur Verdeutlichung des Temperaturverhaltens ist in Abbildung 9.11 die in der Simulation ermittelte Aufteilung der Wärmeübergangsmechanismen für die Reibringkörper beider Bremsscheiben über einen Bewertungszeitraum von 500 Sekunden mit Beginn der Bremsung dargestellt. Wie erwartet ergeben sich Unterschiede im Bereich des konvektiven Wärmetransports und der Wärmeleitung. Die Vorteile des Funktionsblechs und der größeren wirksamen Fläche im Kühlkanal zeigen sich im konvektiven Wärmetransport. Der im Vergleich zur Basis-Bremsscheibe um fast 50 % geringere Anteil der Wärmeleitung ist auf den vergleichsweise hohen Wärmeleitwiderstand zurückzuführen. Zusammenfassend führt das Design der reibgeschweißten Bremsscheibe zu einer um 9 % höheren Kühlleistung im Vergleich zur Basis-Bremsscheibe. In Verbindung mit der geringeren Temperatur im Kühlkanal resultieren daraus Vorteile der reibgeschweißten Bremsscheibe im thermischen Bereich für das vorliegende Lastkollektiv.

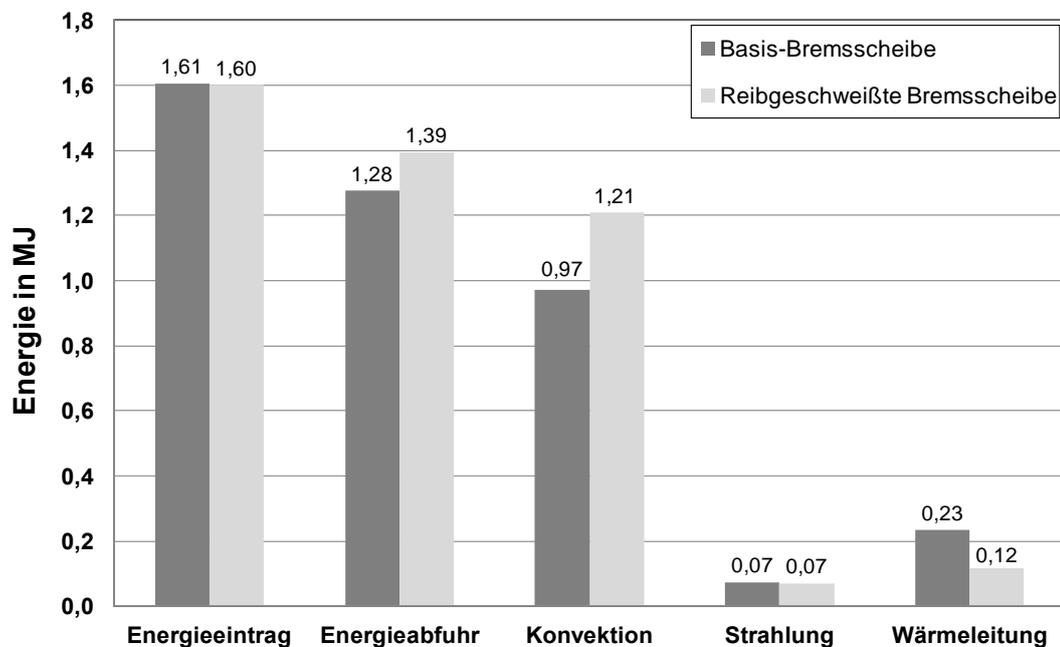


Abbildung 9.11: Energiebilanz des Reibringkörpers während eines Einzelstopps im Vergleich zwischen Basis-Bremsscheibe und reibgeschweißter Leichtbau-Bremsscheibe

Im Hinblick auf eine dauerhafte thermische Belastung wird die Prototyp-Bremsscheibe einem Fading-Test unterzogen. Im Rahmen der Untersuchungen zur reibgeschweißten Bremsscheibe wird der Test genutzt, um weitere Aussagen über die Festigkeit der Anbindung unter maximaler thermischer Last zu treffen. Abbildung 9.12 zeigt den Vergleich der gemessenen Temperaturprofile im Vergleich zur Basis-Bremsscheibe. Die Temperaturmessstellen befinden sich am Reibring, im Anbindungsbereich sowie in der Mantelfläche des Bremsscheibentopfes, was eine detaillierte Aussage über den Wärmestrom ermöglicht.

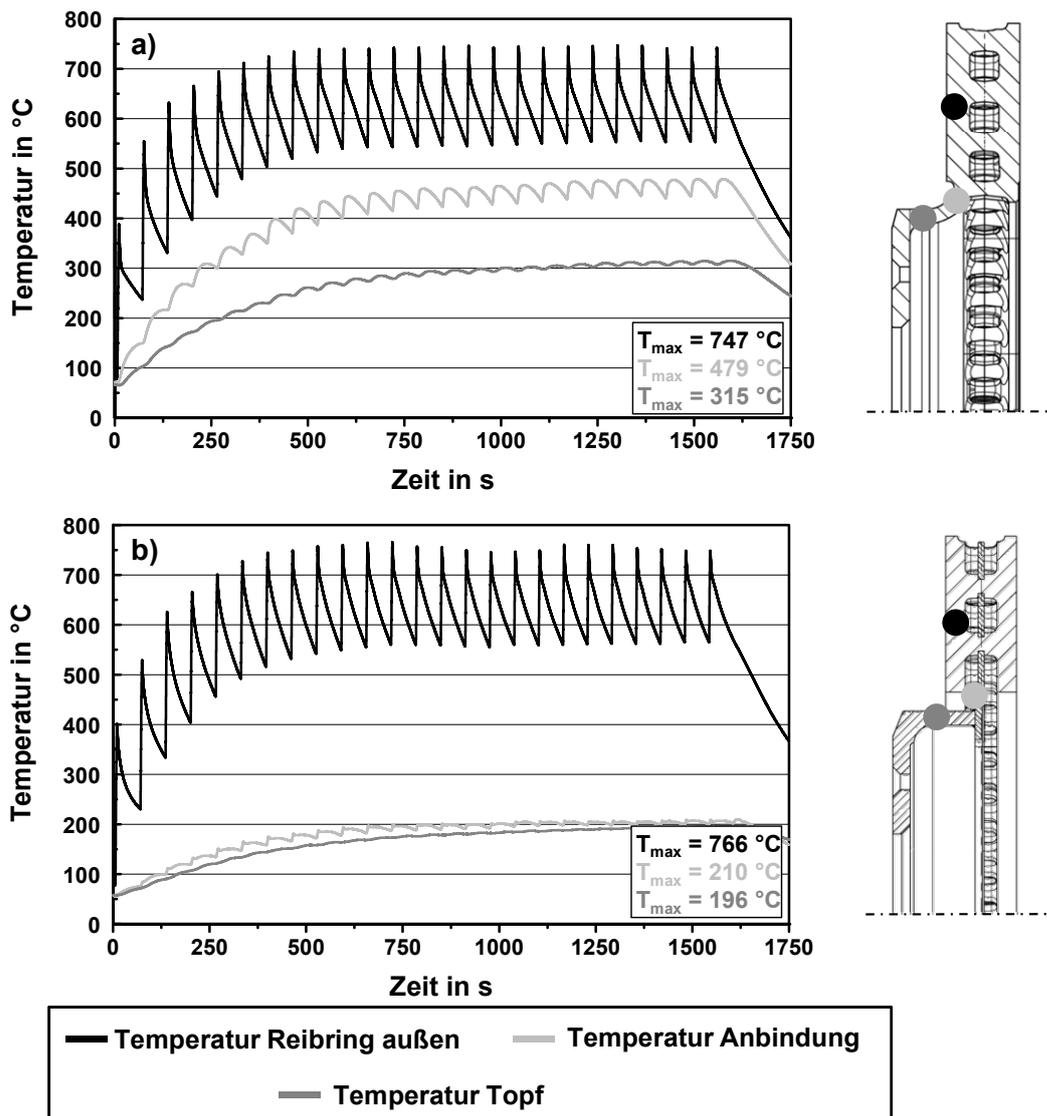


Abbildung 9.12: Vergleich der Temperaturen im Kühlkanal und in der Anbindungszone (rechts Lage der Thermoelemente) – a) Basis-Bremsscheibe, b) Reibgeschweißte Bremsscheibe

Der Vergleich der Spitzentemperaturen beider Bremsscheiben zeigt mit Blick auf die Ergebnisse des High-Performance Tests ein gegenläufiges Verhalten. Das Temperaturniveau der Basis-Bremsscheibe liegt in den Folgebremungen des Fadingtests im Schnitt

um etwa 20 °C unter der reibgeschweißten Bremsscheibe. Ursächlich hierfür ist unter anderem das Lastprofil des Fadingtests, welches durch hohe Lasten und kurze Abkühlzeiten gekennzeichnet ist. Der Vergleich der Ergebnisse der Basis-Bremsscheibe verdeutlicht den höheren Einfluss der Wärmeleitung im Fadingtest. Die Temperatur im Anbindungsbereich der Basis-Bremsscheibe liegt um bis zu 250 °C höher verglichen mit dem High-Performance Test. Für die reibgeschweißte Bremsscheibe ergibt sich in der Fügezone ein Temperaturniveau im Bereich von 200 °C, was deutlich unterhalb der Temperaturen der Basis-Bremsscheibe liegt. Daraus wird die Schlussfolgerung abgeleitet, dass die Energie der Reibschweiß-Scheibe primär über den Reibringkörper in Form von Konvektion abgeführt wird. Aufgrund des annähernd gleichen Temperaturniveaus in den Reibringen beider Bremsscheiben wird davon ausgegangen, dass mit Hilfe des Funktionsblechs die fehlende Wärmeleitung durch eine bessere Konvektion im Kühlkanal nahezu vollständig kompensiert wird.

Mit den Temperaturen in der Fügezone wird der für das Wachstum der intermetallischen Phase als kritisch angenommene Temperaturbereich erreicht. Nach Abschluss der Versuche konnten allerdings keine Anzeichen für eine Schädigung der Anbindungszone in Form von Rissen festgestellt werden.

### 9.3.3 Verformungsverhalten unter thermomechanischer Last

Eine symmetrische Gestaltung des Reibringkörpers in Verbindung mit einer mittigen Anbindung an den Topf, wie im vorliegenden Fall, lässt eine Reduzierung der Schirmung im Vergleich zu einteiligen Bremsscheiben erwarten.<sup>239</sup> Schirmungsbedingt hervorgerufene Beeinträchtigungen der Bremsenfunktion und des Komforts durch Schrägverschleiß von Bremsbelag und Bremsscheibe sowie ungleichmäßige Belaganpressung können reduziert werden,<sup>240</sup> was durch Praxiserfahrungen<sup>241</sup> bestätigt wird. Beispielhaft ist die Verbundgussscheibe zu nennen (vgl. Abbildung 9.13), die durch eine Stiftverbindung zwischen Reibringkörper und Bremsscheibentopf gekennzeichnet ist.

---

<sup>239</sup> Schorn, M.: Produkt- und Prozessinnovation von Grauguss-Bremsscheiben, 2006, S. 4

<sup>240</sup> Dreilich, L.; Pankau, J.; Schmeling, H.-J.: Analyse und Optimierung von Bremsscheibendeformationen unter Temperaturbelastung, 1992, S. 34

<sup>241</sup> Hoffmann, I.; Füllgrabe, F.; Winner, H.: Die Zukunft der Bremsscheibe im Umfeld des Leichtbaus, 2010, S. 52



Abbildung 9.13: Verbundbremsscheibe mit Stiftverbindung zwischen Reibringkörper und Topf

Die erwarteten Vorteile im Schirmungsverhalten werden in den durchgeführten Versuchen bestätigt. In Abbildung 9.14 sind die Verformungswerte für die die Einzelstopp- sowie die Doppelstoppbremsung der Schirmungsuntersuchung dargestellt.

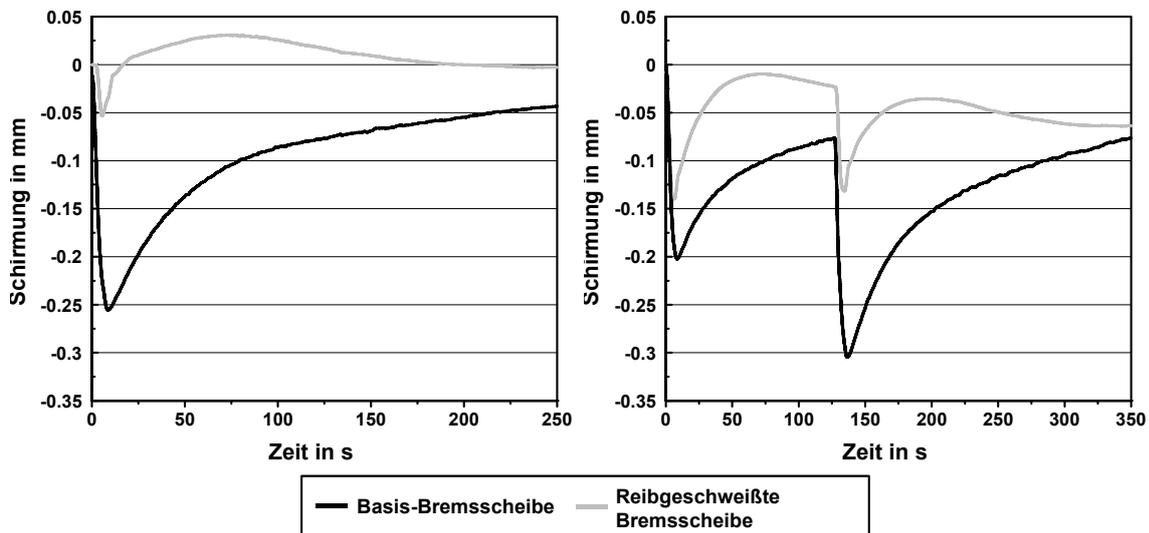


Abbildung 9.14: Thermische Verformung der Basis-Bremsscheibe und reibgeschweißten Bremsscheibe im Einzelstopp (links) und Doppelstopp (rechts)

Die axialen Verformungen der reibgeschweißten Bremsscheibe und der Basis-Bremsscheibe sind annähernd gleich und bewegen sich in einem Bereich zwischen 0,2 mm und 0,6 mm. Die gleichmäßige axiale Verschiebung der Messpunkte am Außen- und Innenradius des Reibringkörpers ist ursächlich für die geringen resultierenden Schirmungswerte der reibgeschweißten Bremsscheibe. Diese liegen im Vergleich teilweise um mehr als 50 % unter den Werten der Basis-Bremsscheibe. Abbildung 9.15 zeigt das Ergebnis einer FE-Analyse der reibgeschweißten Bremsscheibe. Die elastische Anbindungsgestaltung über das Funktionsblech ermöglicht eine gleichmäßige axiale Verformung, die das in Abbildung 9.14 dargestellte Verhalten verdeutlicht.

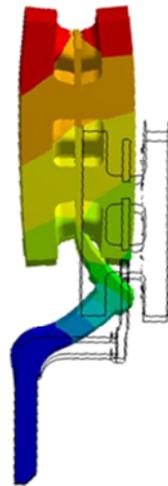


Abbildung 9.15: Schirmung der reibgeschweißten Bremsscheibe in der FE-Analyse

Neben den Absolutwerten weist die Prototyp-Bremsscheibe einen charakteristischen Schirmungsverlauf auf. Nach dem Erreichen eines Maximums zu Beginn der Verzögerung sinkt die Schirmung bis ein Umkehrpunkt erreicht wird (Einzelstopp:  $t \approx 75$  s, Doppelstopp:  $t \approx 75$  s und  $t \approx 200$  s), ab dem die Schirmungswerte wieder leicht ansteigen, bevor die Verformung am Ende der Abkühlphase wieder auf den Ausgangswert zurückgeht. Die Reproduzierbarkeit konnte in weiteren Schirmungsversuchen nachgewiesen werden. Ein Vergleich der axialen Verschiebungen an den Messstellen weist im Vergleich zur Basis-Bremsscheibe keine Auffälligkeiten auf. Auf Basis des aktuellen Erkenntnisstands liegt kein physikalisches Erklärungsmodell für das in den Abkühlphasen beobachtete Schirmungsverhalten vor.

## 9.4 Fazit und Potenzial für weiterführende Untersuchungen

Die reibgeschweißte Leichtbau-Bremsscheibe basiert auf der Grundidee einer Massenreduzierung bei gleichzeitiger Erhöhung der thermischen Leistungsfähigkeit. Ausgehend von der einteiligen Basis-Bremsscheibe wird ein Stahlblech als zusätzliches Funktionselement in den Kühlkanal integriert. Neben einer Erhöhung der für den konvektiven Wärmetransport wirksamen Kühlkanalfläche, wird über das Blech die Anbindung an den Topf mittels Reibschweißen realisiert. Das für die Verbindung gewählte Reibschweißverfahren zeichnet sich hierbei durch einen hohen Automatisierungsgrad aus und ist ein bekanntes Fügeverfahren zur Verbindung Drehmoment übertragender Komponenten. Mit der im Rahmen dieser Arbeit realisierten Prototyp-Bremsscheibe wird eine Massensparnis von 950 g ( $\approx 10$  %) im Vergleich zur Basis-Bremsscheibe erzielt.

Eine Besonderheit des Fertigungsverfahrens ist die sich in der Anbindungszone bildende intermetallische Phase und die Gefahr eines thermisch bedingten Phasenwachstums mit einer daraus resultierenden Versprödung der Anbindungszone. Die in diesem Zusammenhang im Vorfeld als kritisch eingestufte zulässige Maximaltemperatur in der Anbindungszone im Bereich von 180 bis 200 °C wird nur bei extremer Beanspruchung im Fadingtest erreicht. Die Analyse nach Abschluss der Versuche zeigt keine Anzeichen im Bereich der Anbindungszone, die auf eine Schädigung hindeuten.

Die erwarteten Vorteile hinsichtlich des thermischen Verhaltens konnten in den durchgeführten Validierungsversuchen bestätigt werden. Die Geometrie des Funktionsblechs führt im Vergleich zur Basis-Bremsscheibe zu einer Erhöhung des Wärmeleitwiderstands, was im Hinblick auf die zulässigen Spitzentemperaturen am Übergang zum Topf positiv ist. Trotz der deutlich verminderten Wärmeleitung in den Topf und einer Reduzierung der Reibringdicke stellt sich auf der Reibfläche ein mit der Basis-Bremsscheibe vergleichbares Temperaturniveau ein, was auf einen sehr guten Wärmeübergang im Kühlkanal schließen lässt.

Neben den genannten Einflüssen auf den Thermohaushalt der Bremsscheibe beeinflusst das Funktionsblech das Verformungsverhalten unter thermomechanischer Last. Bedingt durch die Anordnung der Komponenten sowie der niedrigen Biegesteifigkeit im Bereich der Anbindung stellt sich eine gleichmäßige Verschiebung am äußeren und inneren Radius ein. Diese führt in der Folge zu deutlich geringeren Schirmungswerten im Vergleich zur Basis-Bremsscheibe. Hinsichtlich des Verschleißbildes der Bremsbeläge ist von einer geringeren Neigung zum Schrägverschleiß auszugehen, was ebenfalls positive Auswirkungen auf den Bremskomfort erwarten lässt. Zu beachten ist jedoch, dass die Absolutwerte der Verformung vergleichbar zur Basis-Bremsscheibe sind, womit weiterhin die Gefahr von Restbremsmomenten während des Abkühlvorgangs besteht.

Wie auch bei der umformend hergestellten Bremsscheibe ist bei der reibgeschweißten Leichtbau-Bremsscheibe das Risiko einer galvanischen Korrosion zu prüfen. Die aus dem Fertigungsverfahren resultierende Wulstbildung ermöglicht temporäre Flüssigkeitsansammlungen, insbesondere im Innenbereich zwischen Topf und Blech (vgl. Abbildung 9.16, rechts), womit die für Kontaktkorrosion notwendige Bedingung eines elektrolytischen Verbindungsmediums zwischen Stahl und Aluminium erfüllt ist. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang die schlechte Zugänglichkeit des Wulstes, was bei Beschichtungsmaßnahmen das Risiko einer unvollständigen Benetzung beinhaltet.

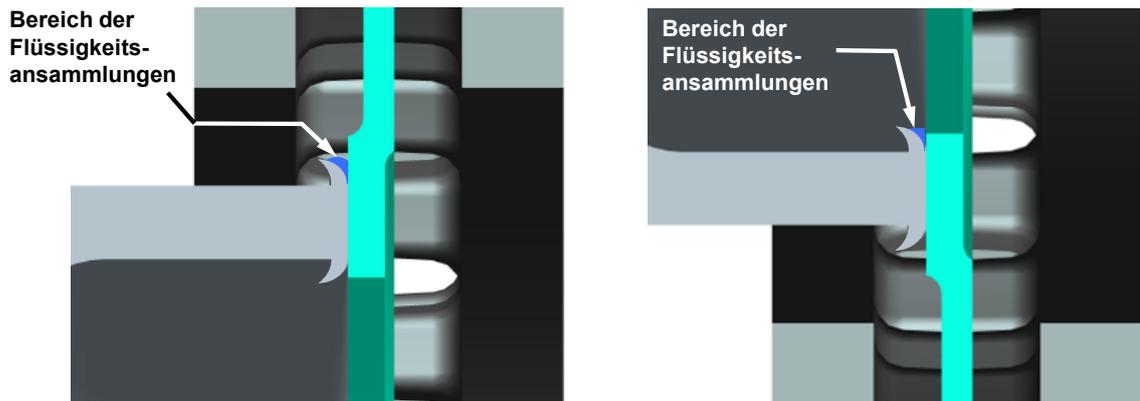


Abbildung 9.16: Potenziell gefährdete Bereiche für Kontaktkorrosion bei der reibgeschweißten Leichtbau-Bremsscheibe

Optimierungsansätze für die Prototyp-Bremsscheibe hinsichtlich Massenersparnis und Funktion resultieren aus einer Anpassung des Funktionsblechs. Abbildung 9.17 zeigt eine Reduzierung des Blechdurchmessers, die eine weitere Senkung der Bauteilmasse von etwa 500 g ermöglicht. Neben den Anforderungen an die Bauteilfestigkeit und das zu übertragende Bremsmoment sind bedingt durch die geringere Fläche im Kühlkanal Einflüsse auf das thermische Verhalten, aber auch auf die resultierende Verformung zu erwarten.

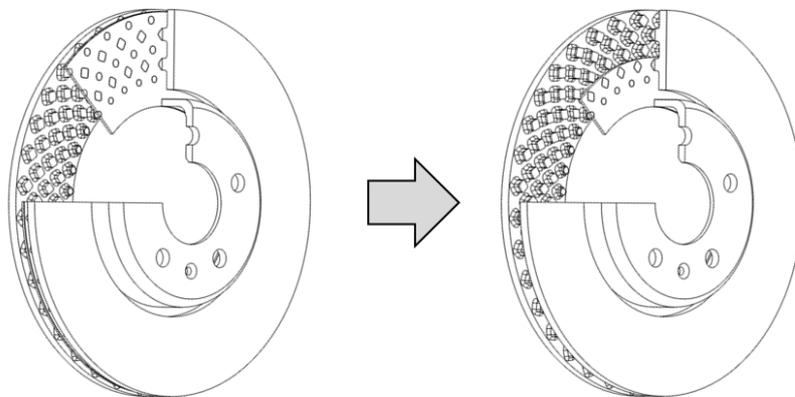


Abbildung 9.17: Weiteres Leichtbaupotenzial der reibgeschweißten Bremsscheibe

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit von Masse und Verformungsverhalten ergibt sich aus der Variation der Blechdicke. In FE-Simulationen ist der Zusammenhang zwischen Blechdicke und dem Verformungsverhalten unter thermomechanischer Last analysiert worden. Ausgehend von der bestehenden Blechgeometrie mit einer Stärke von 2,5 mm zeigen die Simulationsergebnisse eine Zunahme der axialen Verformung mit abnehmender Blechdicke (vgl. Abbildung 9.18). Das Schirmungsverhalten hingegen bleibt auf niedrigem Niveau nahezu unverändert. Auffällig ist das Schirmungsverhalten bei einer Erhöhung der Blechdicke. Die maximale Schirmung ändert ihr Vorzeichen und tritt im Gegensatz zu den Konfigurationen mit dünneren Blechdicken erst während der

Abkühlphase auf, was im Hinblick auf die Entstehung von Restbremsmomenten problematisch ist. Zusammenfassend bietet eine Reduzierung der Blechdicke Vorteile hinsichtlich Massenersparnis und Funktionalität, die in weiterführenden Untersuchungen zu prüfen sind.

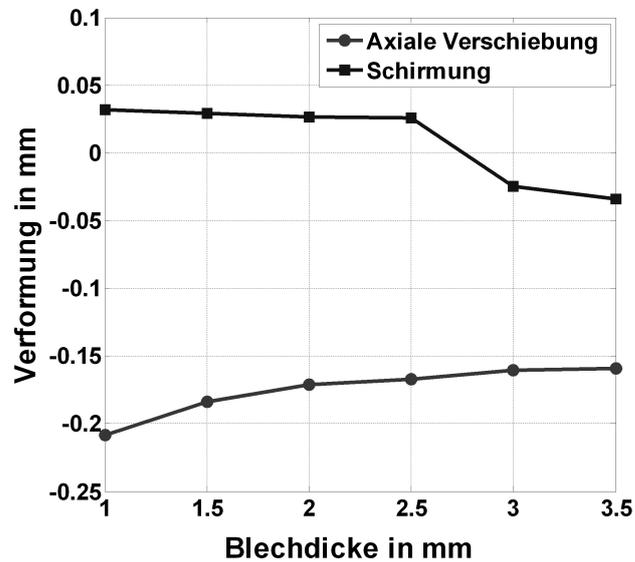


Abbildung 9.18: Ergebnisse der FE-Analyse für die resultierende axiale Verschiebung und Verformung im Schirmungsversuch bei Variation der Blechdicke

## 10 Leichtbau-Bremsscheibe in Hybridbauweise

Die Grundidee des in diesem Kapitel diskutierten Konzepts einer Leichtbau-Bremsscheibe basiert auf einer funktionalen Trennung im Reibringkörper. Hierbei wird die Verschleißfunktion über separate Elemente aus Grauguss realisiert. Der Grundkörper sowie der Bremsscheibentopf werden aus einer Aluminiumlegierung aufgebaut, mit dem Ziel eine geringe Bauteilmasse zu erreichen bei gleichzeitiger Nutzung der thermischen Vorteile durch eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit (vgl. Kapitel 6.2).

### 10.1 Identifizierte Herausforderungen

Aus der Grundidee und dem prinzipiellen Konzeptaufbau der Hybrid-Bremsscheibe, wie er in Abbildung 10.1 dargestellt ist, resultieren funktionale Anforderungen, die sich von den bisher bekannten Bremsscheibenkonzepten unterscheiden. Die für das Hybrid-Konzept spezifischen Anforderungen werden nachfolgend auf Basis der in Kapitel 4.2 beschriebenen Hauptfunktionen diskutiert.

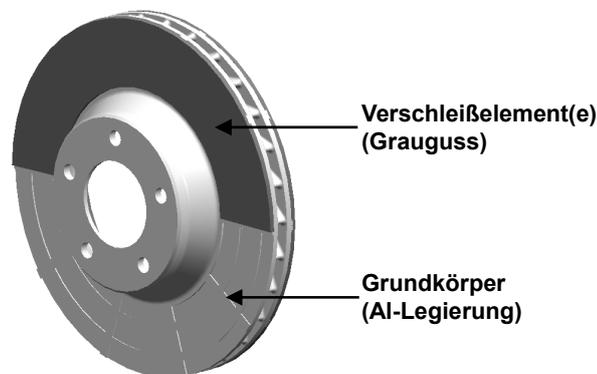


Abbildung 10.1: Prinzipdarstellung des Konzepts einer Hybrid-Bremsscheibe

#### 10.1.1 Anforderungen aus mechanischen Funktionsumfängen

##### Teilfunktion Bremsmoment aufbauen / leiten

Änderungen im Vergleich zu bisher bekannten Bremsscheibenkonzepten ergeben sich vor allem für die Weiterleitung des Bremsmoments. Die Auftrennung der Reibringe in Grundkörper und Verschleißelement setzt eine Verbindung voraus, die eine Bremsmomentleitung zwischen den Komponenten unter allen Betriebsbedingungen gewährleistet.

Änderungen im Bereich des Reibwertaufbaus können aus einer verformungsbedingten (Schirmung) Änderung der Flächenpressung resultieren. Die Umsetzung einer mittigen Anbindung des Reibringkörpers an den Topf lässt einen positiven Einfluss auf das Schirmungsverhalten erwarten.

#### Teilfunktion Verschleiß

Hinsichtlich des Verschleißverhaltens ist eine ausreichende Verschleißelementdicke zu berücksichtigen. Aus üblichen maximalen Verschleißwerten einteiliger Bremsscheiben (0,5–1,5 mm) wird zunächst eine Verschleißelementdicke von 1 mm festgelegt.

### **10.1.2 Anforderungen aus thermischen Funktionsumfängen**

#### Teilfunktion Wärmespeicherung

Im Hinblick auf die thermische Leistungsfähigkeit der Bremsscheibe ist eine ausreichende Wärmekapazität erforderlich, um Schädigungen der Bremsscheibe und angrenzender Komponenten durch thermische Überlast zu vermeiden.

#### Teilfunktion Wärmeübertragung

Aufgrund des konzeptionellen Aufbaus der Hybrid-Bremsscheibe mit einem mehrteiligen Reibringkörper ist vor allem ein Einfluss auf die Wärmeleitung zu erwarten. Die Realisierung einer gleichmäßigen Werkstoffausnutzung sowie die Vermeidung einer Überhitzung der Verschleißelemente setzen einen guten Wärmeübergang zum Grundkörper voraus. Durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Werkstoffe sowie einem potenziell unterschiedlichen Verformungsverhalten unter thermomechanischer Last besteht die Gefahr der Luftspaltbildung. Daraus resultieren Herausforderungen hinsichtlich Verbindungsgestaltung und geometrischer Ausführung der Verschleißelemente und des Grundkörpers.

### **10.1.3 Anforderungen aus Einflüssen von Stör- und Neben- größen**

#### Verformungsverhalten unter thermomechanischer Last

Für die Bewertung des Hybrid-Bremsscheibenkonzeptes werden vor allem eine mögliche Bremsscheibenverwellung und -schirmung unter thermischer und thermomechanischer Last als relevant angesehen. Bedingt durch die Mehrteiligkeit des Reibringkörpers erfolgt zunächst eine getrennte Betrachtung von Grundkörper und Verschleißelementen.

Der Grundkörper der Hybrid-Bremsscheibe ist in seiner Grundform, mit Ausnahme der dünner gestalteten Reibringe, mit herkömmlichen Reibringkörpergeometrien vergleich-

bar. In Untersuchungen zur Entstehung von Hot Spots in Pkw-Scheibenbremsen zeigte Sardá<sup>242</sup> für die von ihm untersuchte einteilige Bremsscheibe, dass bereits eine rein thermische Last zu einer wellenförmigen Verformung des Reibringkörpers einer Bremsscheibe führt. Da dieser Fall in erster Näherung für den Grundkörper der Hybrid-Bremsscheibe angenommen wird, ist dieser auf eine thermisch bedingte Verwellung zu prüfen.

Die Verschleißelemente der Hybrid-Bremsscheibe werden im einfachsten Fall als geschlossene Kreisringscheibe ausgeführt. Nach Untersuchungen von Kremaszky<sup>243</sup> zum elastisch-plastischen Beulen von Kreisringplatten wird wie auch beim Aluminium-Grundkörper von einer thermisch induzierten Verwellung ausgegangen. Weitere Einflussfaktoren auf das Verformungsbild resultieren aus einer möglichen Segmentierung sowie der Anbindungsgestaltung zwischen Verschleißelement und Grundkörper. Darüber hinaus ist ein potenzieller Einfluss durch fertigungsbedingte Eigenspannungen zu berücksichtigen.

Unter Vernachlässigung der Einflüsse durch die Verbindung von Grundkörper und Verschleißelementen wird aufgrund der Geometrie- und Werkstoffunterschiede zunächst von einem unterschiedlichen Verformungsbild der Komponenten ausgegangen. Daraus werden potenzielle negative Einflüsse im Betrieb der Hybrid-Bremsscheibe abgeleitet, die nachfolgend genannt sind:

- Beeinträchtigung der Wärmeleitung durch Luftspaltbildung zwischen Grundkörper und Verschleißelementen.
- Lokale Spannungsüberhöhungen, resultierend aus der Verbindungsgestaltung zwischen Grundkörper und Verschleißelementen.
- Reduzierung der Verschleißelementdicke über Lebensdauer der Bremsscheibe und damit Änderung des Verformungsverhaltens.

Möglichkeiten zur Beeinflussung der Verformung ergeben sich durch eine Segmentierung der Verschleißelemente sowie durch die Ausgestaltung der Anbindung. Die Erstellung eines entsprechenden Lösungsraums ist auf Basis der in Kapitel 5.2 dargestellten Systematik möglich und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter vertieft.

---

<sup>242</sup> Sardá, A. H.: Wirkungskette der Entstehung von Hotspots und Heißrubbeln in Pkw-Scheibenbremsen, 2009

<sup>243</sup> Kremaszky, C.; Lippmann, H.: Frictionally Excited Thermoelastic Instabilities of Annular Plates Under Thermal Pre-Stress, 2005

## 10.2 Thermische Auslegung auf Basis von Simulationsdaten

Ausgehend von einer einteiligen Bremsscheibe aus Grauguss sind durch eine Werkstoffsubstitution mit Aluminium Änderungen im thermischen Verhalten, bedingt durch Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit sowie der Wärmekapazität, zu erwarten. Zusätzlich ist eine Reduzierung der maximal zulässigen Temperaturen zu berücksichtigen. Diese hängen von der verwendeten Legierung sowie dem Einsatz von Verstärkungsphasen ab. Für den Grundkörper der Hybrid-Bremsscheibe wird zunächst ein typischer Al-MMC-Werkstoff mit einer Verstärkungsphase von 20 % SiC und einer maximalen Betriebstemperatur von 450 °C angenommen.<sup>244</sup>

Nachfolgend werden potenzielle thermische Auslegungsstrategien für eine Hybrid-Bremsscheibe aufgezeigt und im Vergleich zu einer einteiligen Bremsscheibe aus Grauguss diskutiert. Für die Bewertung wird das in Kapitel 6 vorgestellte Simulationsmodell genutzt. In der Simulation werden die in Kapitel 6.2 dargestellten Bremsszenarios Stopp- und Schleppebremsung genutzt. Die Änderungen erfolgen ausgehend von der einteiligen Grauguss-Bremsscheibe der Dimension Ø320x30, die auch als Referenz für die Bewertung herangezogen wird. Abbildung 10.2 zeigt die erreichten Maximaltemperaturen im Vergleich zwischen der Basis-Bremsscheibe aus Grauguss und einer Hybrid-Bremsscheibe gleicher Dimension mit einer Verschleißelementstärke von 1 mm pro Reibring.

---

<sup>244</sup> Übersicht der verwendeten Werkstoffdaten, siehe Anhang 13.3

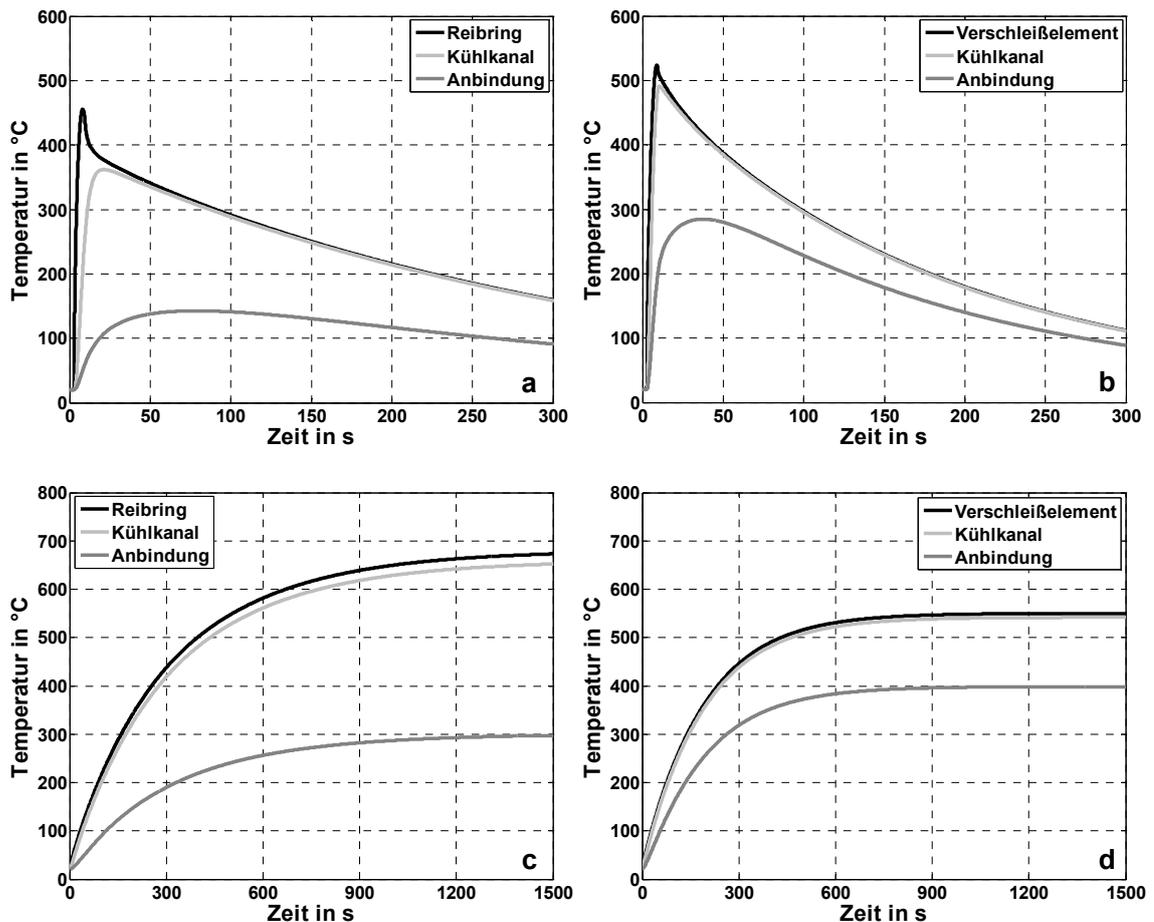


Abbildung 10.2: Simulationsergebnisse der Stoppbremsung: a) Basis-Bremsscheibe, b) Hybrid-Bremsscheibe; Simulationsergebnisse der Passabfahrt: c) Basis-Bremsscheibe d) Hybrid-Bremsscheibe

Der Vergleich der Temperaturverläufe der Stoppbremsungen in Abbildung 10.2 a) und b) zeigt ein höheres Temperaturniveau von etwa 70 °C im Bereich des Reibrings der Hybrid-Bremsscheibe. Bedingt durch die höhere Wärmeleitung steigt auch die Temperatur in der Anbindungszone um etwa 140 °C an. Das Zusammenrücken der Temperaturkurven, insbesondere von Verschleißelement und Kühlkanal, ist eine Folge der besseren Wärmeleitfähigkeit. Das Temperaturniveau im Grundkörper für eine Einmalbremsung im Bereich von 500 °C ist hinsichtlich der thermischen Festigkeit des Werkstoffs kritisch. Trotz einer besseren Wärmeleitung in der Hybrid-Bremsscheibe und einer damit verbundenen schnelleren Abkühlung im Vergleich mit der Basis-Bremsscheibe ist bei Folgebremssungen eine thermische Überlastung zu erwarten. Vorteile der Hybrid-Bremsscheibe zeigen sich wie erwartet bei der in Abbildung 10.2 c) und d) dargestellten Schlepfbremssung. Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Grundkörpers führt zu einer gleichmäßigeren Werkstoffausnutzung und einem um etwa 120 °C niedrigeren Temperaturniveau in der Hybrid-Bremsscheibe.

Zur Verbesserung der thermischen Leistungsfähigkeit der Hybrid-Bremsscheibe ergeben sich ausgehend von der Parametersimulation in 6.2 verschiedene Optimierungsansätze. Die Erhöhung des Bremsscheibendurchmessers führt zu einer Erhöhung der Wärmekapazität sowie einer größeren wirksamen Fläche für Konvektion und Strahlung, was einen positiven Effekt auf den Wärmeübergang in den Abkühlphasen erwarten lässt. In der Praxis steht einer Erhöhung des Bremsscheibendurchmessers vor allem der begrenzte Bauraum entgegen. Eine bauraumneutrale Maßnahme zur Erhöhung der Wärmekapazität stellt die Aufdickung der Verschleißelemente unter Beibehaltung der Gesamtbreite des Reibringkörpers dar. Nachteilig bei diesem Ansatz ist das sinkende Leichtbaupotenzial. Beide Ansätze werden nachfolgend anhand von Simulationsergebnissen bewertet. Tabelle 10.1 zeigt die untersuchten Bremsscheibenkonfigurationen mit der entsprechenden Wärmekapazität der Bremsscheibe.

Tabelle 10.1: Parameter der untersuchten Konfigurationen für eine Hybrid-Bremsscheibe im Vergleich mit einer einteiligen Grauguss-Bremsscheibe

	<b>Basis</b>	<b>Hybrid-Bremsscheibe (HBS)</b>	<b>HBS (RR)</b> Anpassung Reibring	<b>HBS (VE)</b> Anpassung Verschleißelement	<b>HBS (RR+VE)</b> Anpassung Reibring und Verschleißelem.
Dicke Verschleißelement in mm	-	1	1	3	3
Durchmesser Reibringkörper in mm	320	320	340	320	340
Wärmekapazität Bremsscheibe in kJ/K	4,80	3,98	4,56	4,12	4,73

Ein Vergleich der Konfigurationen zeigt, dass eine Kombination aus Erhöhung des Bremsscheibendurchmessers bei gleichzeitiger Aufdickung der Verschleißelemente zu einer annähernd gleichen Wärmekapazität wie bei der Basis-Bremsscheibe führt. Die Grundlage für die Bewertung der Auslegungskonzepte bildet das Szenario der Stoppbremsung. Die Ergebnisse der Maximaltemperaturen der Bremsscheibenbereiche Reibringoberfläche (RR), Verschleißelement (VE), Kühlkanal (KK) und Anbindung (A) im Zusammenhang mit der erreichbaren Massenersparnis zeigt Abbildung 10.3. Die gestrichelte Linie repräsentiert die Grenztemperatur des Al-MMC-Werkstoffs.

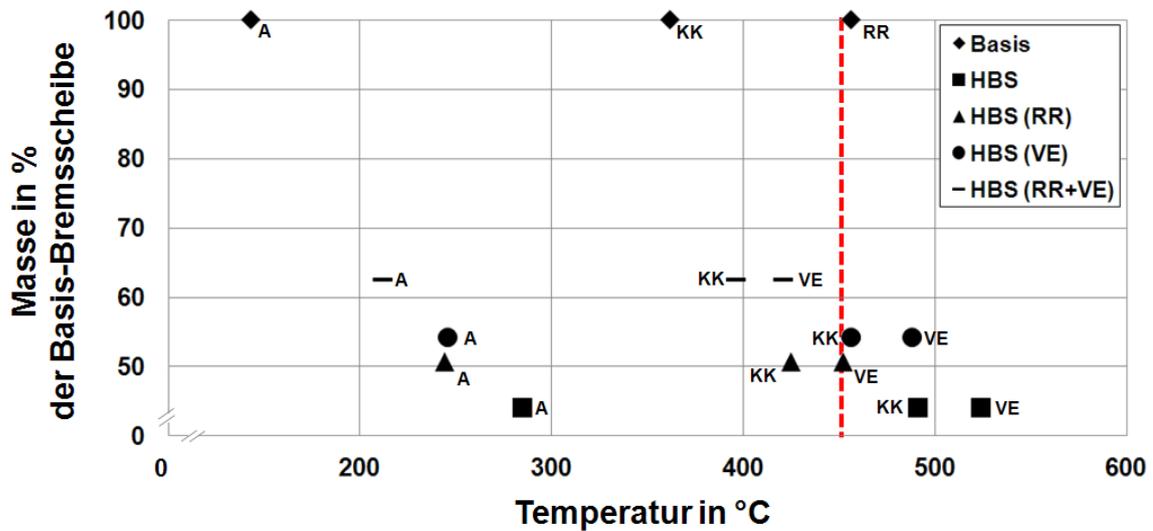


Abbildung 10.3: Vergleich der Massensparnis sowie Temperaturverteilungen für verschiedene Auslegungen einer Hybrid-Bremsscheibe in Bezug zur Basis-Bremsscheibe

Die Darstellung in Abbildung 10.3 verdeutlicht den Vorteil einer Erhöhung des Brems Scheibendurchmessers im Vergleich zu einer Aufdickung. Die Erhöhung des Brems Scheibendurchmessers (RR, Dreieck) zeigt eine deutliche Reduzierung der auftretenden Spitzentemperaturen um 70 °C verglichen zu der Ausgangskonfiguration der Hybrid-Bremsscheibe (Quadrat). In Kombination mit der Aufdickung der Verschleißelemente auf 3 mm (Strich) ergibt sich eine maximale Temperatur im Reibringkörper im Bereich von 400 °C, was einer Reduzierung um 25 % entspricht. Die Anforderungen hinsichtlich der Grenztemperatur sind für das Einzelstopp-Szenario somit erfüllt. Die theoretisch erzielbare Massensparnis dieser Konfiguration von mehr als 35 % liegt deutlich über den Werten, die mit aktuellen Verbundbremsscheiben auf Basis metallischer Werkstoffe erreicht werden ( $\approx 20\%$ ), was das Potenzial einer Bremsscheibe in Hybridbauweise verdeutlicht.

### 10.3 Prototypische Umsetzung

Entgegen der im letzten Abschnitt aufgezeigten thermischen Auslegungsmöglichkeiten einer Hybrid-Bremsscheibe wird als Basis für den Aufbau des Prototyps eine Leichtbau-Bremsscheibe mit Stiftverbindung zwischen Reibringkörper und Brems Scheibentopf gewählt. Neben fertigungstechnischen Gründen sind aufgrund der Brems Scheibenstruktur sowie der gewählten Festsattelbremse vor allem Vorteile im Hinblick auf die Bewertbarkeit der durchzuführenden Untersuchungen zu erwarten. Die Symmetrie des Reibringkörpers in Verbindung mit der mittigen Anbindung an den Brems Scheibentopf

führen zu einer Reduzierung der Schirmung.<sup>245</sup> Durch die Minimierung der Schirmungseinflüsse wird eine bessere Trennbarkeit zwischen globalem Verformungsverhalten der Bremsscheibe und lokalem Verformungsverhalten der Verschleißelemente erwartet. Für die Anpassung an den verwendeten Festsattel wurde der Außendurchmesser der als Basis verwendeten Verbundguss-Bremsscheibe von 360 mm auf 347,5 mm verringert. Die wesentlichen Daten der Basis-Verbundbremsscheibe sind in Tabelle 10.2 aufgeführt.

Tabelle 10.2: Relevante Daten der Basis-Verbundbremsscheibe

<b>Außenradius Reibringkörper in mm</b>	173,75
<b>Innenradius Reibringkörper in mm</b>	110
<b>Reibpfadhöhe in mm</b>	63,75
<b>Gesamtbreite Reibringkörper in mm</b>	32
<b>Breite eines Reibrings in mm</b>	10
<b>Kühlkanalweite in mm</b>	12
<b>Axiale Bauhöhe der Bremsscheibe in mm</b>	46,5
<b>Bremsscheibenmasse in kg</b>	10,85

Weitere Vorteile werden durch den Einsatz einer Festsattelbremse erwartet, die in ihren Eigenschaften dem Serienstand entspricht. Die im Vergleich zu einem Faustsattel höhere Steifigkeit des Festsattels führt im Betrieb zu einer homogenen Anpressdruckverteilung der Bremsbeläge<sup>246</sup> als Folge einer geringeren Sattelaufweitung. Aufgrund der homogenen Belaganpressung wird auch von einem gleichmäßigeren Energieeintrag ausgegangen, was im Hinblick auf die Auswertung des thermischen Verhaltens einer Hybrid-Bremsscheibe positiv zu bewerten ist.

Für die prototypische Umsetzung der Hybrid-Bremsscheibe wird ein Konzept mit sechs Verschleißelementen pro Reibring realisiert. Die Verschleißelemente haben für die vorliegende Bremsscheibe eine Stärke von 4 mm. Der Reibringkörper besteht analog zum Bremsscheibentopf aus einer Aluminiumguss-Legierung und wird entsprechend Abbildung 10.4 a) für den Einsatz der Verschleißelemente bearbeitet. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche werden die Verschleißelemente (vgl. Abbildung 10.4 b) über jeweils neun Schrauben an den Grundkörper angebunden. Über die Stege des Grundkörpers (vgl. Abbildung 10.4 d) erfolgt die Abstützung der Verschleißelemente in Umfangsrichtung zur Minimierung der für Schraubverbindungen ungünstigen Scherbelastung. In den Übergangsbereichen der Stege verfügen die Verschleißele-

---

<sup>245</sup> vgl. Kapitel 2.2.3.1

<sup>246</sup> Füller, K.-H.: Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen, 1998, S. 8

mente über Fasen, um die Gefahr eines Verkantens des Bremsbelags während der Bremsung zu reduzieren. Die Masse der Prototyp-Bremsscheibe beträgt 6,44 kg, was einer Massensparnis von 4,41 kg ( $\approx 40\%$ ) entspricht.

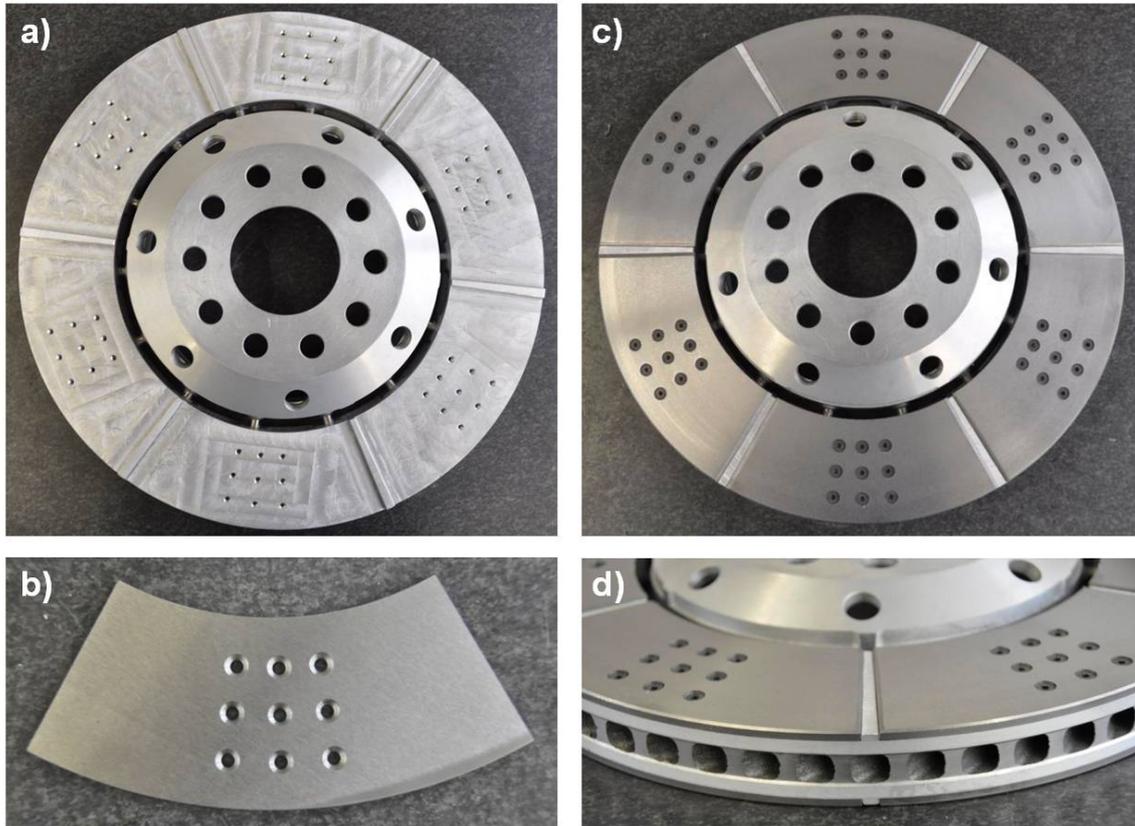


Abbildung 10.4: a) Grundkörper der Hybrid-Bremsscheibe mit Topf, b) Verschleißelement, c) Prototyp der Hybrid-Bremsscheibe, d) Detaildarstellung des Übergangs zwischen den Verschleißelementen

## 10.4 Prüfstandsversuche

### 10.4.1 Versuchsaufbau und durchgeführte Versuche

Die experimentelle Untersuchung der Hybrid-Bremsscheibe erfolgt in verschiedenen Bremsversuchen an einem Schwungmassenprüfstand.<sup>247</sup> Analog zu den bisher durchgeführten Versuchen werden die Fahrzeugdaten für die Prüfprogramme übernommen.

Bedingt durch die Stiftverbindung und die daraus resultierende stark eingeschränkte Wärmeleitung in den Topfbereich steht vor allem der Wärmeübergang zwischen Ver-

<sup>247</sup> Leistungsdaten des eingesetzten Schwungmassenprüfstands, siehe Anhang 13.5.1, Tabelle 13.8

schleibelement und Grundkörper im Fokus der Untersuchungen. Für die Bewertung des thermischen Verhaltens und des Wärmeübergangs wird die Temperaturverteilung in zwei Bereichen untersucht. Abbildung 10.5 zeigt die beiden Sensor-Konfigurationen, die sich lediglich durch die Anordnung der Temperatursensoren in Umfangsrichtung unterscheiden. Ziel der beiden Anordnungen ist den Einfluss eines verformungsbedingten Luftspalts zwischen Verschleißelement und Grundkörper auf den Wärmeübergang zu quantifizieren. Hierzu werden drei Temperatursensoren radial über das Verschleißelement verteilt. Eine weitere Messstelle befindet sich zur Bewertung des Wärmeübergangs radial mittig im Aluminiumgrundkörper.

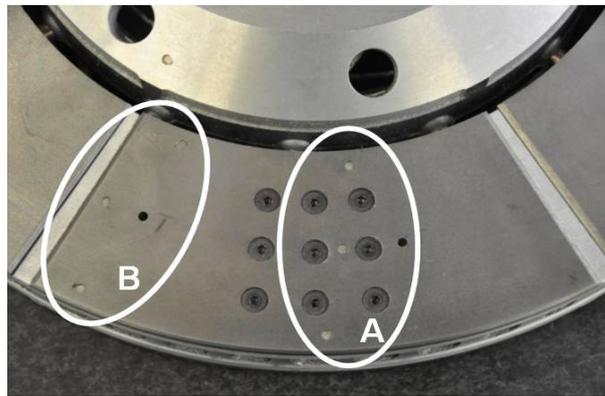


Abbildung 10.5: Position der Thermoelemente für die Konfiguration A und die Konfiguration B

Für die Aufnahme des Verformungsverhaltens der Hybrid-Bremsscheibe werden pro Reibringseite drei kapazitive Wegsensoren eingesetzt, die radial über die Reibpfadhöhe verteilt positioniert sind. Abbildung 10.6 zeigt den Aufbau des Bremssystems der Hybrid-Bremsscheibe mit Anordnung der Thermoelemente sowie der Aufnahme für die kapazitiven Wegsensoren.

Die Untersuchungen der Hybrid-Bremsscheibe erfolgen anhand von Stopp- und Schleppbremsungen. Als Referenz werden die Versuchsergebnisse einer Basis-Verbundbremsscheibe gleicher Dimension mit Grauguss-Reibringkörper herangezogen. Bedingt durch den Einsatz einer unverstärkten Aluminiumlegierung im Grundkörper sowie der für die Prototyp-Bremsscheibe gewählten Schraubverbindungen werden die Lasten reduziert. Die Versuchsdurchführung erfolgt mit folgenden Parametersätzen:

- Stoppbremsung aus 100 km/h bei 10 bar Bremsdruck, entsprechend einem mittleren Bremsmoment von 300 Nm bzw. einer mittleren Verzögerung von  $1,5 \text{ m/s}^2$
- Schleppbremsung bei 40 km/h und 10 bar Bremsdruck, entsprechend einem mittleren Bremsmoment von 300 Nm bzw. einem mittleren Gefälle von 15 %.

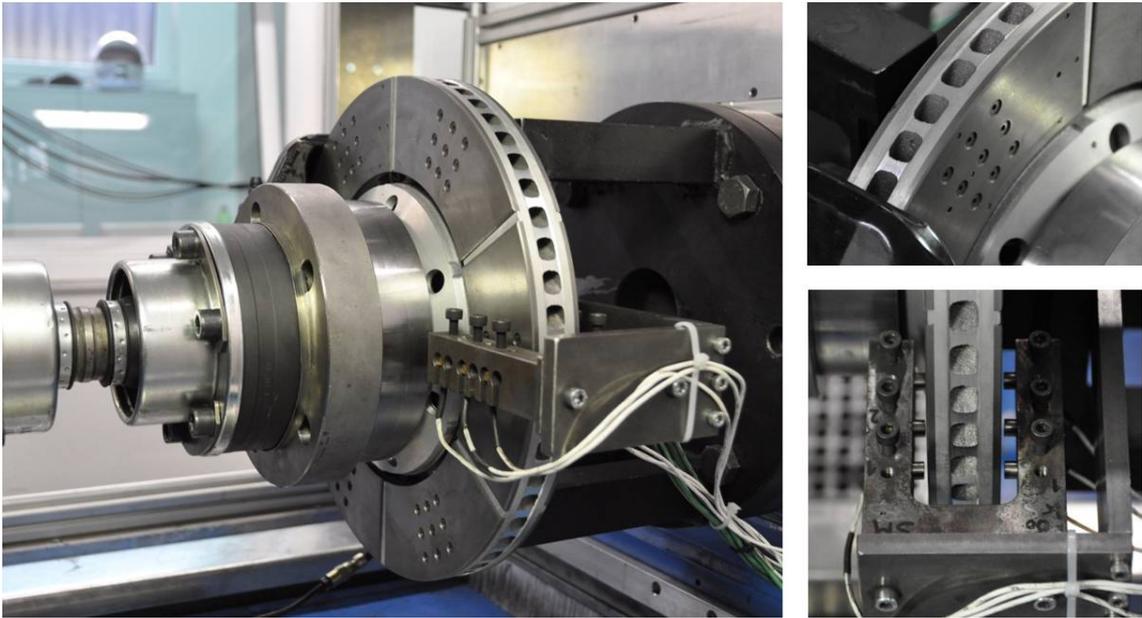


Abbildung 10.6: Prüfaufbau der Hybrid-Bremsscheibe in der Prüfkammer des Schwungmassenprüfstands (links), Detailaufnahme der Temperaturmessstellen (rechts oben), Detailaufnahme der kapazitiven Abstandssensoren (rechts unten)

## 10.4.2 Versuchsergebnisse

### 10.4.2.1 Thermisches Verhalten

Die Temperaturverläufe für die Stoppbremsungen sowie die lokal an den Messpositionen erreichten Maximaltemperaturen sind in Abbildung 10.7 tabellarisch und grafisch zusammengefasst. Bei allen drei Messungen liegt die Spitzentemperatur jeweils im Bereich des Außenradius und nimmt zum Innenradius ab. Auffällig ist die im Vergleich zur Basis-Bremsscheibe größere Temperaturspreizung der Hybrid-Bremsscheibe zwischen Innen- und Außenradius, die vor allem in den Messungen der Konfiguration B deutlich wird. Während die gemessenen Temperaturen an der Oberfläche der Hybrid-Bremsscheibe für die Konfiguration A in Abhängigkeit der radialen Messposition zwischen 10 °C und 40 °C über denen der Vergleichsscheibe mit Grauguss-Reibring liegen, beträgt die Differenz für die Konfiguration B teilweise über 70 °C. Das insgesamt höhere Temperaturniveau der Hybrid-Bremsscheibe deutet auf einen lokal schlechteren Wärmeübergang hin, insbesondere im Randbereich. Bedingt durch die fehlende Fesselung des Verschleißelements kann in diesem Bereich eine lokal freie Ausdehnung erfolgen. Weiterer Indikator für einen schlechteren Wärmeübergang ist der ebenfalls in Abbildung 10.7 erkennbare zeitlich verzögerte Temperaturanstieg im Grundkörper der Hybrid-Bremsscheibe, insbesondere für die Konfiguration B. Weiterhin sind in diesem Zusammenhang die Temperaturverläufe in der Verschleißelementmitte und im Grundkörper für die Konfiguration A auffällig. Trotz der in diesem Bereich vorliegenden

Anbindung zwischen Verschleißelement und Grundkörper ist verglichen mit der Basis-Bremsscheibe ein zeitlicher Verzug beider Verläufe zu erkennen. Zur Überprüfung der Annahme, dass der schlechtere Wärmeübergang aus einem Luftspalt zwischen Verschleißelementen und Grundkörper resultiert, erfolgt eine vereinfachte Betrachtung mit Hilfe des Simulationsmodells. Die Ergebnisse (vgl. Anhang 13.7, Abbildung 13.18) zeigen für eine Stoppbremsung und einen Luftspalt von 1/100 mm zu den Versuchsergebnissen qualitativ ähnliche Verläufe. Es wird davon ausgegangen, dass bereits der konstruktiv vorhandene Luftspalt zu einer Beeinträchtigung des Wärmeübergangs führt.

Ein möglicher Zusammenhang zwischen Temperatur und Verformung, zum Beispiel durch Abhebeeffekte an den Kanten der Verschleißelemente, ist im Rahmen der Verformungsanalyse zu prüfen.

	Basis	HBS (A)	HBS (B)
Temperatur RR / VE außen in °C	119,9	159,1	192,2
Temperatur RR / VE mitte in °C	102,2	128,3	148,9
Temperatur RR / VE innen in °C	100,9	111,0	122,0
Temperatur Grundkörper in °C	98,8	115,9	112,1

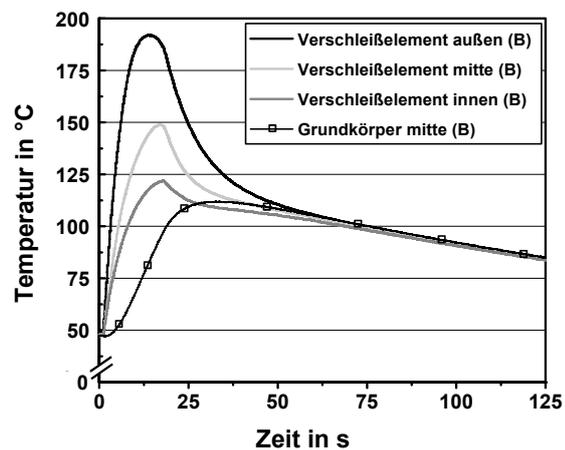
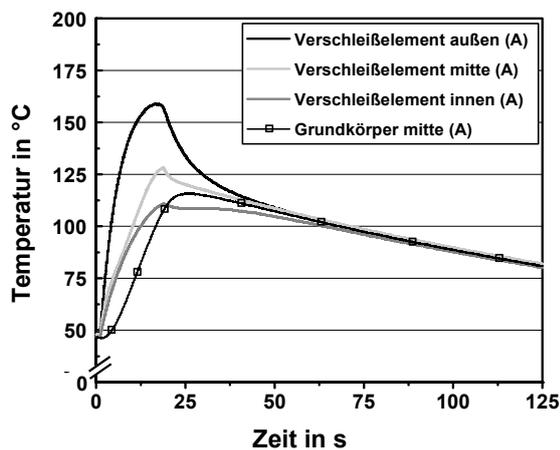
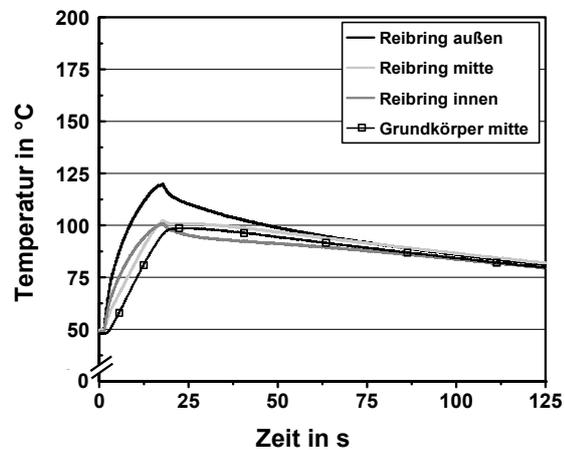


Abbildung 10.7: Vergleich der Spitzentemperaturen und Temperaturverläufe von Basis-Bremsscheibe (oben rechts) sowie Hybrid-Bremsscheibe (unten links Konfiguration A, unten rechts Konfiguration B) für eine Stoppbremsung

Die Temperaturverläufe der Schleppbremsungen werden jeweils in den ersten 150 s ausgewertet und sind in Abbildung 10.8 dargestellt. Auch hier zeigt sich während der Bremsung ein durchgängig höheres Temperaturniveau der Hybrid-Bremsscheibe, was im Hinblick auf die in Kapitel 10.2 dargestellten Simulationsergebnisse nicht erwartet

wurde. Als Ursache wird, wie auch bei den Stoppbremsungen, ein schlechterer Wärmeübergang der Hybrid-Bremsscheibe vermutet. Die in der Analyse der Stoppbremsungen identifizierten Indikatoren lassen sich auf die Ergebnisse der Schleppbremsungen übertragen. Während die Basis-Bremsscheibe eine annähernd homogene Temperaturverteilung aufweist, ist bei der Hybrid-Bremsscheibe vor allem zu Beginn der Bremsung ein deutlich schnellerer Temperaturanstieg am Außenradius des Verschleißelements im Vergleich zu den weiteren Messstellen zu beobachten. Mit zunehmender Bremsdauer weist die Hybrid-Bremsscheibe sowohl in der Mitte (Konfiguration A) als auch im Randbereich (Konfiguration B) eine zur Basis-Bremsscheibe vergleichbare Temperaturspreizung auf. Auffällig ist der in allen drei Messungen zu beobachtende Wechsel der lokal heißesten Stelle auf der Reibfläche vom Außenradius in Richtung Scheibenmitte. Ein Zusammenhang zwischen den Temperaturverläufen und einer entsprechenden Verformung ist im Rahmen der Analyse des Verformungsverhaltens zu prüfen.

	Basis	HBS (A)	HBS (B)
Temperatur RR / VE außen in °C	267,4	321,3	326,7
Temperatur RR / VE mitte in °C	280,3	335,1	345,8
Temperatur RR / VE innen in °C	240,9	296,6	300,6
Temperatur Grundkörper in °C	265,6	308,0	302,8

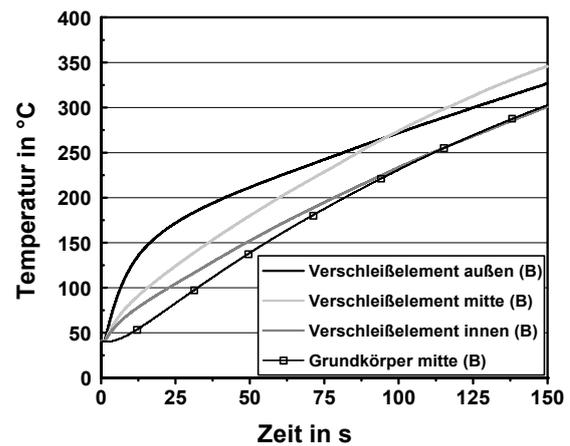
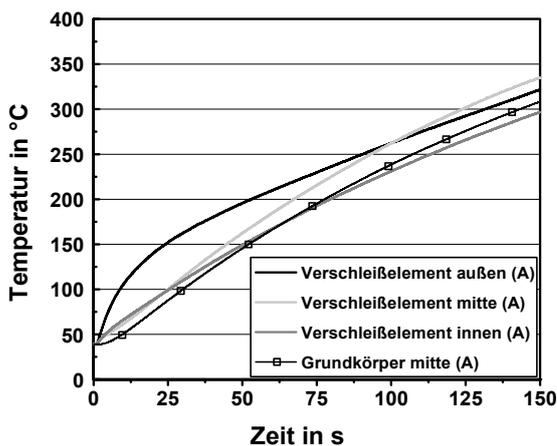
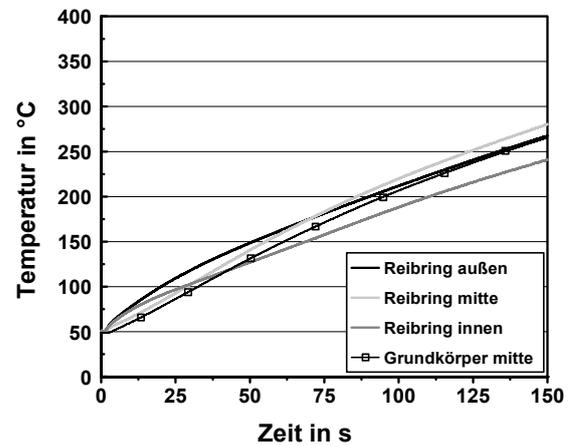


Abbildung 10.8: Vergleich der Spitzentemperaturen und Temperaturverläufe von Basis-Bremsscheibe (oben rechts) sowie Hybrid-Bremsscheibe (unten links Konfiguration A, unten rechts Konfiguration B) für eine Schleppbremsung

## 10.4.2.2 Verformungsverhalten

Die Verformung der Bremsscheibe wird während der Versuche mit sechs kapazitiven Abstandssensoren am Reibringkörper aufgenommen (vgl. Abbildung 10.6). Ausgehend von den Ergebnissen zum thermischen Verhalten im vorangegangenen Kapitel ist ein möglicher Zusammenhang zwischen Verformung und Temperatur zu prüfen. Hierzu werden die Verformungen unmittelbar vor und nach der Stoppbremsung für jeweils zwei Scheibenumdrehungen aufgezeichnet. Für die nabenseitige Verformung (Radinnenseite) sind die entsprechenden Verläufe in Abbildung 10.9 dargestellt.

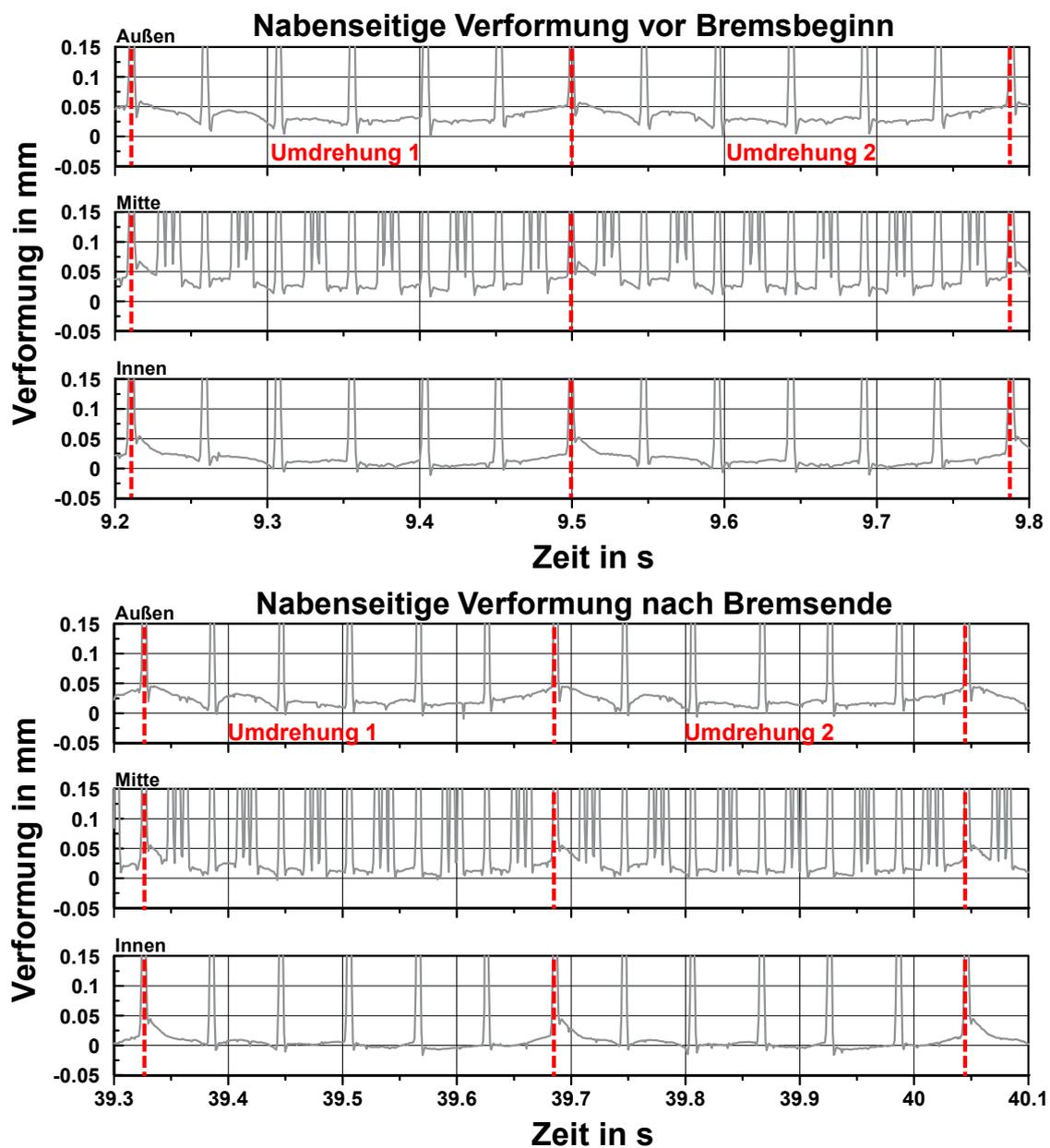


Abbildung 10.9: Nabenseitige Verformung der Hybrid-Bremsscheibe unmittelbar vor (oben) und nach der Bremsung (unten) für alle drei Radien

Deutlich zu erkennen ist die Topographie der einzelnen Verschleißelemente sowie die aus der Bearbeitung resultierenden Dickenschwankungen. Die unterbrochenen Verläufe auf dem mittleren Radius resultieren aus den Verschraubungspunkten. Ein Vergleich der Messungen vor und nach der Bremsung zeigt keine Anzeichen für ein Abheben der Verschleißelemente in den Randbereichen. Eine leichte axiale Verschiebung ( $\approx 1/100$  mm) in Sensorrichtung ist auf allen drei Radien zu beobachten. Die Darstellung der Verformung für die Radseite ist ergänzend in Anhang 13.7 dargestellt. Die Analyse des Verschleißelements mit den Temperaturmessstellen, welches radseitig montiert ist, weist weder im Ausgangszustand noch im Endzustand eine Abhebung an den Ecken auf. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass in den Versuchen kein Zusammenhang zwischen einer ursprünglich vorliegenden oder durch die Bremsung hervorgerufenen Verformung an den Ecken in Verbindung mit der ungleichmäßigen Temperaturverteilung nachgewiesen werden konnte.

Im Hinblick auf den Bremskomfort und das Auftreten möglicher Rubbelerscheinungen sind die Bremsmoment- und Bremsdruckverläufe wichtige Indikatoren. Abbildung 10.10 zeigt die entsprechenden Verläufe am Ende der Stoppbremsung für die Hybrid-Bremsscheibe sowie für die als Referenz genutzte Basis-Bremsscheibe.

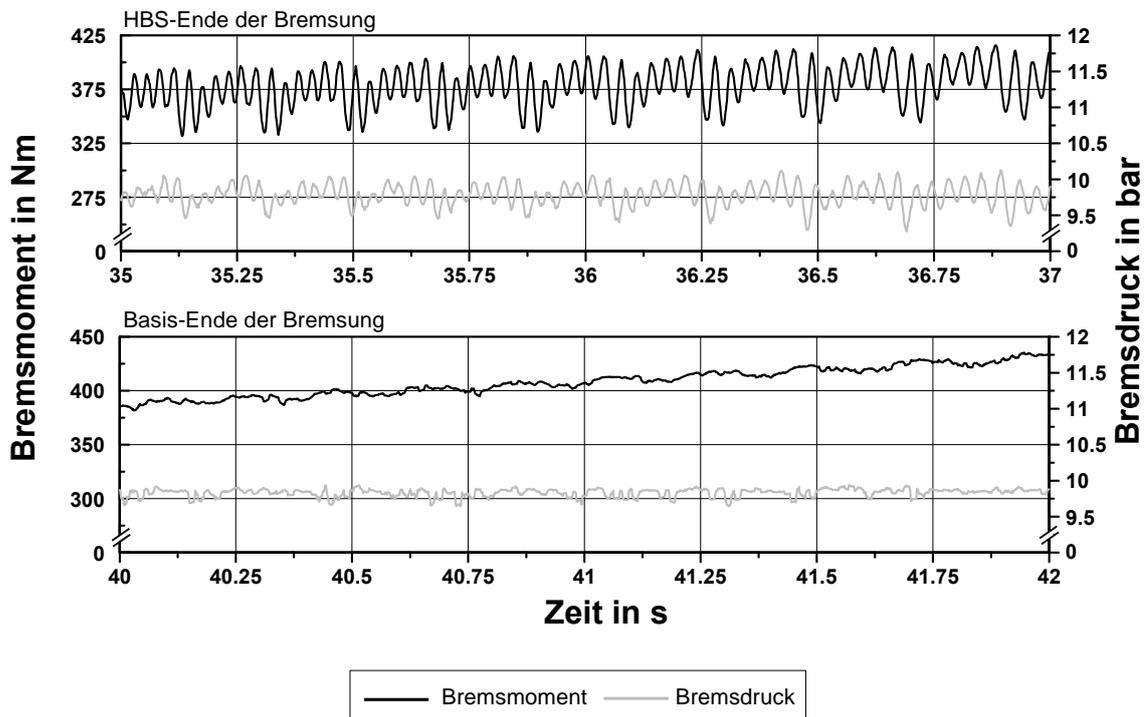


Abbildung 10.10: Zeitliche Verläufe von Bremsmoment und Bremsdruck am Ende der Bremsung im Vergleich zwischen Basis-Bremsscheibe und Hybrid-Bremsscheibe

Die Verläufe der Hybrid-Bremsscheibe zeigen im Vergleich deutliche Schwankungen in Moment und Druck und sind durch eine auffällige Periodizität gekennzeichnet, die in der Ordnung mit der Zahl der Verschleißelemente pro Seite korreliert. Eine Beeinträch-

tigung des Bremskomforts ist somit zu erwarten. Als Schlussfolgerung ist festzuhalten, dass die Anordnung der Verschleißelemente, trotz der Fasen an den Übergängen, zu Beeinträchtigungen durch Bremsdruck- und Bremsmomentschwankungen führt.

## 10.5 Fazit und weiterführende Untersuchungen

Die Grundidee der Hybrid-Bremsscheibe basiert auf einer Einbindung von Werkstoffen auf Aluminiumbasis in den Reibringkörper, um die Vorteile der geringen Werkstoffdichte zu nutzen. Zur Vermeidung der Nachteile durch die im Vergleich zu Grauguss geringere Wärmekapazität sowie der bei Bremsscheiben aus Al-MMC-Werkstoffen nachteiligen Reibeigenschaften (vgl. Kapitel 2.2.3.3), erfolgt eine Funktionstrennung innerhalb des Reibringkörpers. Dieser ist hierzu in einen Grundkörper aus einer Aluminiumlegierung und Verschleißelemente aus Grauguss aufgeteilt.

Die Ergebnisse der thermischen Simulation verdeutlichen die Notwendigkeit einer Geometrie Anpassung, um die zulässigen Temperaturen einzuhalten. Durch eine Vergrößerung des Bremsscheibendurchmessers sowie einer Aufdickung der Verschleißelemente, unter Beibehaltung der Gesamtbreite des Reibringkörpers, wird das Temperaturniveau unter die als kritisch bewertete Temperatur von 450 °C im Grundkörper gesenkt. Die errechnete Massensparnis liegt trotz der Anpassungen bei 35 % und damit deutlich über dem Potenzial bekannter metallischer Leichtbau-Bremsscheiben ( $\approx 15\text{--}20\%$ ). Für den Aufbau der Prototyp-Bremsscheibe wird als Grundlage eine Verbundbremsscheibe mit Stiftverbindung und einem Topf aus einer Aluminiumlegierung genutzt. Aus fertigungstechnischen Gründen besteht der Grundkörper aus einer unverstärkten Aluminiumlegierung. Über eine Schraubverbindung sind pro Reibring sechs Verschleißelemente aus Grauguss mit einer Stärke von 4 mm mit dem Grundkörper verbunden. Die Massensparnis im Vergleich zu der dimensionsgleichen Verbundbremsscheibe mit Reibringkörper aus Grauguss beträgt 4,41 kg ( $\approx 40\%$ ).

Die Versuchsergebnisse der Hybrid-Bremsscheibe am Schwungmassenprüfstand zeigen für die Bremsszenarien Stoppbremsung und Schleppbremsung verglichen mit der Basis-Bremsscheibe eine deutlich höhere radiale Temperaturspreizung sowie ein insgesamt höheres Temperaturniveau. Der zeitlich verzögerte Temperaturanstieg im Grundkörper, insbesondere im Randbereich, deutet auf einen schlechteren Wärmeübergang als Folge einer Luftspaltbildung hin. Eine vereinfachte Abschätzung per Simulation zum Einfluss eines Luftspalts auf den Wärmeübergang zeigt für einen Luftspalt von 1/100 mm qualitativ ähnliche Verläufe, was die Vermutung stützt. Die Ergebnisse der Verformungsmessungen weisen keine Anzeichen für eine Verformung in den Randbereichen der Verschleißelemente auf. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen einem Abheben der

Verschleißelemente und dem verzögerten Temperaturanstieg im Grundkörper konnte somit nicht nachgewiesen werden.

Im Hinblick auf weitere Forschungsarbeiten werden aus den vorliegenden Ergebnissen zur Hybrid-Bremsscheibe offene Fragestellungen abgeleitet. In diesem Zusammenhang ist das thermisch und thermomechanisch bedingte Verformungsverhalten der Verschleißelemente bei Variation geometrischer Einflussfaktoren und unter Berücksichtigung der Verbindungsgestaltung mit dem Grundkörper zu untersuchen. Neben funktionalen Aspekten ist bei der Verbindungsgestaltung einer Hybrid-Bremsscheibe der Fertigungsaufwand zu berücksichtigen, da dieser unmittelbar die späteren Bauteilkosten beeinflusst.

# 11 Fazit und Ausblick

## 11.1 Ergebnisse

Aus dem Stand der Technik und Forschung wird eine Gegenläufigkeit zwischen erreichbarer Massenersparnis und dem erforderlichen Aufwand bei bestehenden Brems-scheiben identifiziert. Unter dem Oberbegriff Aufwand werden in dieser Arbeit kosten-relevante Kriterien wie Materialkosten und Fertigungsaspekte (z.B. Anzahl der Prozess-schritte) zusammengefasst. Darauf aufbauend erfolgt die Konkretisierung der Ziel-setzung dieser Arbeit. Neben der Erarbeitung von Konzepten für Leichtbau-Bremsscheiben, die im Vergleich zu bisherigen Leichtbau-Bremsscheiben durch einen geringeren Aufwand gekennzeichnet sind, steht der Lösungsraum zwischen metalli-schen Verbundbremsscheiben und CMC-Bremsscheiben im Fokus der Arbeit.

Die Ableitung potenzieller Lösungskonzepte für Leichtbau-Bremsscheiben, die den definierten Lösungsraum adressieren, erfolgt ausgehend von einer in dieser Arbeit aufgebauten Systematik von Brems-scheiben. In die Systematisierung fließen lösungs-beinflussende Variationsmerkmale in Form der Teilfunktionen, Werkstoffe sowie der Fertigungs- und Verbindungstechnik ein, was in einer Systematik mit drei, nicht hierar-chisch angeordneten Ebenen mündet.

- Auf **Komponentenebene** werden massive und einteilige Brems-scheiben in die Bereiche Reibringkörper, Anbindung und Topf unterteilt, wobei die Funktions-zuordnung keine klare funktionale Trennung erkennen lässt. Aktuelle Leichtbau-Bremsscheiben in Verbundbauweise sind durch eine Mehrteiligkeit nach der ge-nannten Einteilung gekennzeichnet.
- Auf **Funktionsebene** werden Lösungen für die im Rahmen der funktionalen Zerlegung einer Brems-scheibe identifizierten Teilfunktionen abgeleitet.
- Die **Verbindungsebene** beschreibt die Variationsmöglichkeiten im Fertigungs- und Verbindungsbereich. Die Verbindungsgestaltung bei mehrteiligen Brems-scheibenkonzepten ist Haupteinflussfaktor hinsichtlich des Fertigungsaufwands und ermöglicht zudem eine Funktionsbeeinflussung.

Der gewählte mehrstufige Ansatz verzichtet auf eine hierarchische Struktur der Systematik und ermöglicht damit unterschiedliche Herangehensweisen im Lösungsfindungs-prozess. Die Einbindung der dargestellten Ebenen ist abhängig von den vorherrschenden Anforderungen an die Brems-scheibe selektiv möglich. Die Ergänzung um weitere Detaillierungsebenen ist insbesondere auf Verbindungsebene möglich.

Aus der erstellten Systematik werden erste potenzielle Lösungsansätze neuartiger Leichtbau-Bremsscheiben abgeleitet und beschrieben. Die funktionale Gliederung der Konzepte lässt eine Beeinflussung der thermischen Leistungsfähigkeit erwarten, deren Ausprägung aufgrund mangelnder Vergleichbarkeit zu bestehenden Lösungen nicht ohne weitere Analysen bewertbar ist. Mit dem Ziel einer schnellen Bewertung der thermischen Leistungsfähigkeit von Bremsscheiben zur Unterstützung des Auslegungs- und Auswahlprozesses wird in dieser Arbeit ein thermisch-analytisches Simulationsmodell entwickelt, welches hinsichtlich Bauart, Geometrie und Werkstoffen der Bremsscheibe parametrierbar ist. Aufbauend auf Prüfstandsversuchen erfolgt die erfolgreiche Modellprüfung hinsichtlich der Abbildung der Maximaltemperatur und des Abkühlprozesses. Unter der idealen Annahme eines gleichmäßigen Energieeintrags liegen die simulierten maximalen Reibringtemperaturen innerhalb der ermittelten Standardabweichung der Versuche. In Verbindung mit den Analyseergebnissen des Abkühlverhaltens (Abkühlrate und Abkühlzeit) von Versuch und Simulation ist die Modellgenauigkeit ausreichend im Hinblick auf die Nutzung des Modells in dieser Arbeit. Einige wesentliche Aspekte sind aus den Ergebnissen der durchgeführten Parameteranalyse festzuhalten.

- Eine **Vergrößerung der Querschnittsfläche der Topfanbindung** führt bei einer Haltebremsung zu einer deutlichen Temperaturzunahme im Topf von ca. 55 °C, wohingegen die Temperaturabnahme im Reibringkörper mit 12 °C deutlich geringer ist. Ein vergleichbares Verhalten zeigt sich für eine Stoppbremsung. Eine stärkere Nutzung der Wärmekapazität des Topfes zur Senkung des Temperaturniveaus im Reibringkörper erscheint nicht zielführend.
- Eine **Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangs im Kühlkanal** um 50 % führt für die vorliegende Bremsscheibe zu einer Senkung des Temperaturniveaus in der Bremsscheibe von etwa 60 °C bei einer Haltebremsung sowie einer Reduzierung der Abkühlzeit um 13,5 %.
- Bei einer **erforderlichen Anhebung der Wärmekapazität** ist bei Erfüllung der Bauraumanforderungen eine Erhöhung der Reibpfadhöhe einer Aufdickung des Reibringkörpers aufgrund der im Vergleich stärker steigenden wirksamen Fläche für Konvektion und Strahlung vorzuziehen.

Aus dem Lösungsraum der Systematik werden unter Einbeziehung der in der Simulation gewonnenen Erkenntnisse drei Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben mit unterschiedlichen Schwerpunkten abgeleitet und prototypisch umgesetzt. Eine kurze Charakterisierung der Konzepte sowie die für jedes Konzept wichtigsten Erkenntnisse sind nachfolgend zusammengefasst.

Das Konzept der **umformend hergestellten Leichtbau-Bremsscheibe** zeichnet sich dadurch aus, dass die Fertigung des Aluminiumtopfes und die Verbindung mit dem Grauguss-Grundkörper in einem Prozessschritt erfolgen. Hierfür kommt eine Kombination der umformenden Fertigungsverfahren Drücken und Drückwalzen zum Einsatz. Die Einsparung von Prozessschritten im Vergleich zu bekannten mehrteiligen Konzepten in Verbindung mit einer endkonturnahen Fertigung reduziert den Fertigungsaufwand und bietet Potenzial zur Kostensenkung. Die Versuche am Schwungmassenprüfstand zeigen, verglichen mit der Basis-Bremsscheibe, ähnliche Ergebnisse in Bezug auf thermische Leistungsfähigkeit, Rissbildung und Schirmung. Die erreichbare Massenersparnis wird primär über die axiale Bautiefe des Topfes und die Größe des Materialdopplungsbereiches beeinflusst und beträgt für die Prototyp-Bremsscheiben etwa 350 g ( $\approx 4\%$ ).

Das Konzept der **reibgeschweißten Leichtbau-Bremsscheibe** basiert auf der Optimierung von zwei Eigenschaften. Neben der Reduzierung der Bauteilmasse durch Substitution des Topfwerkstoffs Grauguss zu Aluminium wird ausgehend von dem in der thermischen Analyse gezeigten Potenzial zur Erhöhung der Kühlleistung ein Stahlblech mittig in den Kühlkanal integriert. Zusätzlich zu einer Kühlfunktion bildet das Blech am Innenradius die Verbindungsstelle zwischen Reibringkörper und Topf. Die Verbindung wird über Reibschweißen realisiert, womit eine Aufwandsreduzierung durch Verzicht auf zusätzliche Verbindungselemente erzielt wird. Im Gegenzug wird durch das Funktionsblech im Kühlkanal ein zusätzliches Element benötigt, welches in den Gießprozess integriert wird und damit den Mehraufwand im Fertigungsprozess minimiert. Der erhöhte Wärmeleitwiderstand des Blechs erweist sich als positiv im Hinblick auf die begrenzte thermische Belastbarkeit der Reibschweißverbindung. Trotz der konstruktiv erforderlichen Reduzierung der Reibringstärke und der daraus resultierenden lokalen Senkung der Wärmekapazität, wird in den durchgeführten Versuchen ein gleichwertiges thermisches Verhalten bezüglich der Basis-Bremsscheibe beobachtet, was insbesondere bei Folgestoppbremsungen auf die gesteigerte Kühlleistung zurückgeführt wird. Weitere Vorteile des Anbindungskonzepts zeigen sich durch eine stabilisierende Wirkung des Blechs bei rissbedingtem Bauteilversagen sowie durch reduzierte Schirmungswerte verglichen mit der Basis-Bremsscheibe. Die erzielte Massenersparnis liegt bei etwa 950 g ( $\approx 10\%$ ).

Aus der Funktionsanalyse und den Ergebnissen der thermischen Analyse wird das Konzept einer **Bremsscheibe in Hybridbauweise** abgeleitet, wobei der Reibringkörper funktional in Verschleißelemente aus Grauguss und einen Grundkörper mit Kühlkanal aus einer Aluminiumlegierung zerlegt wird. Der hohe Aluminiumanteil im Vergleich zu bisherigen Verbundbremsscheiben auf Basis von Grauguss und Aluminium verspricht ein Masseneinsparpotenzial im Bereich von 30 bis 40 %. Auf Basis des thermisch-analytischen Modells wird gezeigt, dass eine geometrische Anpassung zur Erhöhung der Wärmekapazität erforderlich ist, die unter Berücksichtigung der Bauraumanforderungen idealerweise durch eine Erhöhung der Reibpfadhöhe realisiert wird. Erste Versuche an

einer Prototyp-Bremsscheibe zeigen deutliche Temperaturunterschiede in Scheibendickenrichtung, die insbesondere in den Randbereichen der Verschleißelemente auf einen schlechten Wärmeübergang, beispielsweise durch einen Luftspalt zwischen Verschleißelement und Reibringgrundkörper, hindeuten. Die Ergebnisse einer vereinfachten thermischen Simulation zur Bewertung des Einflusses eines Luftspalts zeigen bereits bei einem Luftspalt von 1/100 mm qualitativ ähnliche Temperaturverläufe, womit die Vermutung bekräftigt wird. Die Ergebnisse der Verformungsmessungen zeigen keine Anzeichen für eine Verformung in den Randbereichen der Verschleißelemente, womit ein ursächlicher Zusammenhang zwischen einem Abheben der Verschleißelemente und dem verzögerten Temperaturanstieg im Grundkörper nicht nachgewiesen werden kann.

Die drei in dieser Arbeit realisierten Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben decken im definierten Lösungsraum zwischen Massenersparnis und Aufwand die zu Beginn der Arbeit formulierten Zielbereiche ab (vgl. Abbildung 7.1, S. 86). Die beiden erstgenannten Konzepte der umformend hergestellten Leichtbau-Bremsscheibe und der reibgeschweißten Leichtbau-Bremsscheibe wurden in Versuchen am Schwungmassenprüfstand erfolgreich erprobt. Das in der Simulation aufgezeigte Potenzial einer Hybrid-Bremsscheibe konnte in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen nicht bestätigt werden. Auf das Optimierungspotenzial sowie den weiteren Forschungsbedarf, insbesondere in Bezug auf die Hybrid-Bremsscheibe, wird im folgenden Ausblick eingegangen.

## 11.2 Ausblick

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit wird die Frage der Übertragbarkeit der entwickelten Leichtbau-Bremsscheiben diskutiert und offene Fragestellungen sowie Potenzial für weiterführende Forschungsaktivitäten aufgezeigt.

Die umformend hergestellte Leichtbau-Bremsscheibe wie auch die reibgeschweißte Leichtbau-Bremsscheibe werden ausgehend von einer Serienbremsscheibe eines Mittelklassefahrzeugs (Audi A4 B8 (Typ 8K), Bremsscheibendimension: Ø320x30) aufgebaut, wobei neben der Dimension auch die bestehende geometrische Grundstruktur übernommen wird. Die konstruktiv bedingten Änderungen für die beiden Konzepte konnten für die Prototypen ohne nennenswerte Einschränkungen umgesetzt werden. Für eine Neukonstruktion der beiden Lösungskonzepte sind bezüglich eines Einsatzes in verschiedenen Fahrzeugklassen die konstruktiven Anforderungen durch das maximale Bremsmoment, insbesondere bei der Formelementgestaltung der umformend hergestellten Leichtbau-Bremsscheibe, zu berücksichtigen. Eine weitere Einschränkung hinsichtlich der Übertragbarkeit auf andere Fahrzeuge wird nicht gesehen.

Für das Konzept der umformend hergestellten Leichtbau-Bremsscheibe wird insbesondere im Fertigungsbereich Optimierungspotenzial gesehen. Hinsichtlich einer Reduzierung des Fertigungsaufwands der Formelemente, die in den Prototyp-Bremsscheiben durch spanende Fertigungsverfahren realisiert wurden, wird die Erzeugung der Verzahnungsgeometrie im Gießprozess als erforderlich angesehen. In diesem Zusammenhang ist eine gieß- und funktionsgerechte Verzahnungsgestaltung zu prüfen, auch vor dem Hintergrund einer höheren erreichbaren Massenersparnis. Weiteres Potenzial für die umformend hergestellte Bremsscheibe wird in einer Innenverzahnung gesehen. Die Anbindung des Aluminiumtopfes am Innendurchmesser führt bedingt durch die größere thermische Ausdehnung von Aluminium zu einer Selbstverstärkung, die das Risiko einer Lösung des Topfes im Betrieb minimiert. Es ist zu prüfen, ob durch umformende Fertigungsverfahren, wie beispielsweise Innenprojizieren, eine hinsichtlich des Aufwands vergleichbare Fertigung realisierbar ist.

Das Konzept der reibgeschweißten Leichtbau-Bremsscheibe ist vor allem durch das Funktionsblech im Kühlkanal gekennzeichnet. Mögliche Optimierungspotenziale des Funktionsblechs sind in Kapitel 9.4 bereits benannt worden. Eine Reduzierung des Blechdurchmessers (vgl. Abbildung 9.17, S. 121) bietet Leichtbaupotenzial, führt jedoch zu einer Reduzierung der wirksamen Wärmeübergangsfläche und ist daher insbesondere in Bezug auf die thermische Leistungsfähigkeit zu prüfen. Im Zusammenhang mit dem thermischen Verhalten ist der Temperatureinfluss mit Blick auf eine mögliche Versprödung der Anbindungszone und einem potenziell erhöhten Rissbildungsrisiko zu untersuchen. Die thermische Belastung in den durchgeführten Validierungsversuchen erfolgt typischerweise über einen kurzen Zeitraum und gibt daher keine Auskunft über das Langzeitverhalten. Für die Überprüfung eines Zusammenhangs zwischen Höhe der Temperatur, Einwirkdauer und Wachstum der intermetallischen Phase für den Anwendungsfall einer Bremsscheibe wird eine Werkstoffanalyse, beispielsweise in Form von Schliffbildern, als geeignete Methode angesehen. Weitere Fragestellungen resultieren aus der Beeinflussbarkeit des Schirmungsverhaltens durch die Blechgeometrie. Erste Simulationsergebnisse für eine Variation der Blechdicke wurden in Kapitel 9.4 bereits dargestellt und bieten Potenzial für weitergehende Untersuchungen an entsprechenden Prototyp-Bremsscheiben.

Das Konzept der vorgestellten Leichtbau-Bremsscheibe in Hybridbauweise bietet für weitere Forschungsaktivitäten das größte Potenzial der drei Konzepte. Im Vergleich zu bekannten Leichtbau-Bremsscheiben auf Basis metallischer Werkstoffe zeichnet es sich durch ein deutlich höheres Leichtbaupotenzial von bis zu 40 % im Vergleich zu einteiligen Grauguss-Bremsscheiben aus. Auf Basis der Simulation wurde eine thermische Auslegung durchgeführt, deren Inhalte als Grundlage für weiterführende Arbeiten genutzt werden können. Als Herausforderung zeichnet sich die Umsetzung des Wärmeübergangs zwischen Verschleißelement und Grundkörper ab. Hinsichtlich einer Optimierung wird eine stoffschlüssige Verbindung vorgeschlagen, deren werkstofftechnische

Zusammensetzung und Integration in den Fertigungsprozess zu erarbeiten ist. Zur Entlastung der Zwischenschicht ist eine Erweiterung um eine formschlüssige Komponente zu prüfen. Weiterer Forschungsbedarf wird im Verformungsverhalten unter thermischer und thermomechanischer Last gesehen. Es wird davon ausgegangen, dass Verschleißelemente und Grundkörper, bedingt durch Unterschiede in Geometrie und Werkstoff, ein unterschiedliches Verformungsverhalten aufweisen. Die Optimierung hinsichtlich der von außen messbaren Gesamtverformung ist vor dem Hintergrund des Bremskomforts und dem Auftreten von Rubbelerscheinungen oder Restbremsmomenten von Bedeutung. Die Analyse des Verformungsverhaltens der Einzelkörper unter Einbeziehung der Verbindung wird als relevant bezüglich der auftretenden Spannungen und einer möglichen mechanischen Überbeanspruchung gesehen.

## 12 Zusammenfassung

Der Leichtbau als Maßnahme zur Senkung des Streckenkraftstoffverbrauchs gewinnt bedingt durch eine von der Gesetzgebung verstärkte Limitierung der Emissionen stetig an Bedeutung. Im Fahrwerk bietet die Radbremse mit einem Massenanteil von bis zu 40 % der Radaufhängung ein erhöhtes Leichtbaupotenzial. Hierbei ist die Bremsscheibe neben dem Bremssattel eine wesentliche Komponente, die die Masse der Radbremse beeinflusst. Zur Senkung der Masse existieren für Bremsscheiben bereits Leichtbaulösungen in Serienanwendungen. Diese sind durch die Verwendung von Leichtbauwerkstoffen und eine mehrteilige Ausführung der Bremsscheibe in Verbundbauweise gekennzeichnet, wodurch im Vergleich zu einteiligen Bremsscheiben aus Grauguss zusätzliche Kosten entstehen. Mit zunehmender Massenersparnis steigt der erforderliche Aufwand in Form der eingesetzten Fertigungsverfahren und Materialkosten, was insbesondere bei Bremsscheiben auf Basis keramischer Werkstoffe deutlich wird. Das Ziel dieser Arbeit besteht daher in der Erarbeitung und Bewertung von Konzepten für Leichtbau-Bremsscheiben, die im Vergleich zu bisherigen Lösungen durch einen geringeren Aufwand gekennzeichnet sind und hinsichtlich der erreichbaren Massenersparnis die Lücke zwischen metallischen und keramischen Verbundbremsscheiben schließen.

Ausgangspunkt für die Konzeptfindung bildet die funktionale Analyse einer Bremsscheibe in Verbindung mit einer Prozessbetrachtung, aus der die Haupt- und Teilfunktionen abgeleitet und mit ihren Eigenschaftsmerkmalen beschrieben werden. Die Ergebnisse fließen in die Erstellung einer Bremsscheiben-Systematik ein, die die Grundlage für die Identifikation geeigneter Lösungskonzepte darstellt. Die Systematik basiert auf drei Variationsebenen. Neben der Funktionsebene, in die die Ergebnisse der funktionalen Analyse einfließen, erfolgt eine Betrachtung auf Komponentenebene. Auf der dritten Ebene wird die Verbindungs- und Fertigungstechnik berücksichtigt, die insbesondere bei mehrteiligen Bremsscheibenkonzepten von Bedeutung ist.

Die Konzeptauswahl wird durch ein in dieser Arbeit entwickeltes thermisch-analytisches Modell unterstützt. Das Modell ermöglicht für verschiedene Bremsszenarien die schnelle Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit einer Bremsscheibe bei Variation werkstofftechnischer und geometrischer Parameter, was unterstützend in den Phasen der Konzeptfindung und Konzeptbewertung eingesetzt wird. Aus dem im Rahmen der Bremsscheiben-Systematisierung aufgebauten Lösungsraum und den Ergebnissen der thermischen Analyse werden drei Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben auf Basis der Werkstoffe Grauguss und Aluminium abgeleitet und anhand einer relevanten Bremsscheibengeometrie prototypisch umgesetzt. Die Überprüfung der Konzepte erfolgt in Versuchen am Schwungmassenprüfstand im Vergleich zur Serienbremsscheibe.

Das Konzept der umformend hergestellten Leichtbau-Bremsscheibe zeichnet sich dadurch aus, dass die Fertigung des Aluminium-Topfes und die Anbindung an den Grauguss-Reibringkörper durch eine Kombination der umformenden Fertigungsverfahren Drücken und Drückwalzen in einem Prozessschritt erfolgen. Die Ergebnisse der Versuche am Schwungmassenprüfstand sind bezüglich thermischer Leistungsfähigkeit, Rissbildung und Schirmung mit der Serienbremsscheibe vergleichbar. Die erzielte Massenersparnis liegt bei etwa 350 g ( $\approx 4\%$ ).

Das in der thermischen Analyse gezeigte Potenzial zur Erhöhung der Kühlleistung durch einen Anstieg der konvektiv wirksamen Fläche wird im zweiten realisierten Konzept funktional durch ein in den Kühlkanal integriertes Stahlblech umgesetzt. Das Blech erfüllt zudem die Funktion des Verbindungselements zwischen Grauguss-Reibringkörper und Aluminium-Topf. Die Verbindung zwischen Blech und Topf erfolgt über Reibschweißen. Die Versuchsergebnisse am Schwungmassenprüfstand verdeutlichen die Vorteile des Anbindungskonzepts insbesondere in Bezug auf Rissbildung und Schirmungsverhalten. Die erzielte Massenersparnis liegt bei etwa 950 g ( $\approx 10\%$ ).

Aus der Funktionsanalyse und den Ergebnissen der thermischen Analyse wird das Konzept einer Leichtbau-Bremsscheibe in Hybridbauweise abgeleitet, welches sich im Vergleich mit bestehenden metallischen Verbundbremsscheiben durch ein deutlich höheres Masseneinsparpotenzial ( $> 30\%$ ) auszeichnet. Der Reibringkörper wird funktional in Verschleißelemente aus Grauguss und einen Grundkörper mit Kühlkanal aus einer Aluminiumlegierung aufgeteilt. Die in der Simulation dargestellten Vorteile hinsichtlich des thermischen Verhaltens können in Versuchen mit einer Prototyp-Bremsscheibe nicht bestätigt werden. Als Ursache wird der nicht ideale Wärmeübergang zwischen den Verschleißelementen und dem Grundkörper gesehen, was hinsichtlich weiterführender Forschungsarbeiten von Bedeutung ist.

Ausgehend von der erfolgreichen Validierung zweier Leichtbau-Bremsscheiben, die die Zielsetzung dieser Arbeit erfüllen, werden abschließend weitere Optimierungs- und Forschungspotenziale für die drei in dieser Arbeit diskutierten Bremsscheibenkonzepte abgeleitet.

## 13 Anhang

### 13.1 Darstellung der Patentrecherche

Als Suchraum der Patentrecherche diente vor allem die IPC-Klasse F16D „Nicht schaltbare Kupplungen; ein- und ausrückbare Kupplungen; Bremsen“ mit den Unterklassen 65/00 „Teile oder Einzelheiten von Bremsen“ und 69/00 „Reibbeläge; deren Befestigung; Auswahl zusammenwirkender Reibwerkstoffe oder Reibflächen“. Suchbegriffe in deutscher und englischer Sprache waren unter anderem Bremsscheibe, Bremsrotor, Scheibenbremse, Reibring, die mit Begriffen wie Leichtbau, Verbund und Werkstoffen kombiniert wurden. Neben Ergebnissen, in denen Leichtbau- und Kostenziele adressiert werden, wurden auch Treffer berücksichtigt, in denen eine Mehrteiligkeit der Bremsscheibe zur Verbesserung des Komfort- oder Verschleißverhaltens beschrieben wird.

Abbildung 13.1 zeigt einen Auszug der Rechercheergebnisse mit relevanten Patenten nach Verbindungscharakteristik gruppiert und zeitlich eingeordnet. Auffallend ist die Vielzahl an Patentanmeldungen im Bereich formschlüssiger Verbindungen mit und ohne Verbindungselemente. Weiterhin ist die steigende Anzahl von Patentanmeldungen im Beschichtungsbereich auffällig. Reibkraftschlüssige und formschlüssige Verbindungen sind hingegen von untergeordneter Bedeutung. Zusammenfassend verdeutlicht die Vielzahl an Patentanmeldungen in Verbindung mit der zeitlichen Verteilung die zunehmende Relevanz von Bremsscheiben in Verbundbauweise.

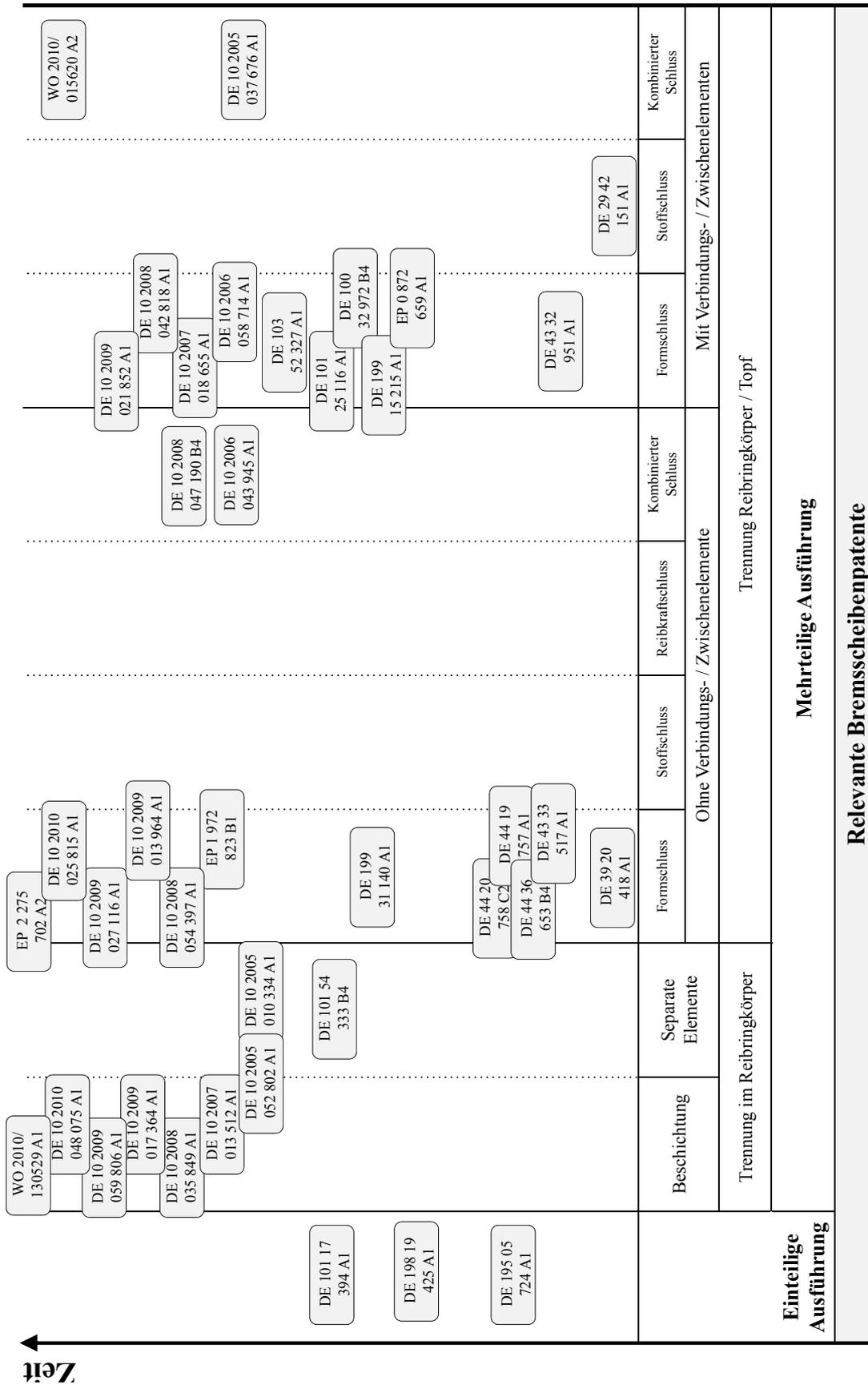


Abbildung 13.1: Übersicht relevanter Brems Scheibenpatente

## 13.2 Einteilung der Fügeverfahren

Tabelle 13.1: Einteilung der Fügeverfahren nach DIN 8593<sup>248</sup>

Hauptgruppe	Gruppen	Untergruppen	
4. Fertigungsverfahren Fügen	4.1 Zusammensetzen	DIN 8593-1	4.1.1 Auflegen, Aufsetzen, Schichten
			4.1.2 Einlegen, Einsetzen
			4.1.3 Ineinanderschieben
			4.1.4 Einhängen
			4.1.5 Einrenken
			4.1.6 Federnd Einspreizen
	4.2 Füllen	DIN 8593-2	4.2.1 Einfüllen
			4.2.2 Tränken, Imprägnieren
	4.3 An- und Einpressen	DIN 8593-3	4.3.1 Schrauben
			4.3.2 Klemmen
			4.3.3 Klammern
			4.3.4 Fügen durch Presspassung
			4.3.5 Nageln, Verstiften, Einschlagen
			4.3.6 Verkeilen
			4.3.7 Verspannen
	4.4 Fügen durch Urformen	DIN 8593-4	4.4.1 Ausgießen
			4.4.2 Einbetten
			4.4.3 Vergießen
			4.4.4 Eingalvanisieren
			4.4.5 Ummanteln
			4.4.6 Kitten
	4.5 Fügen durch Umformen	DIN 8593-5	4.5.1 Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper
			4.5.2 Fügen durch Umformen bei Blech-, Rohr- und Profilleiten
			4.5.3 Fügen durch Nietverfahren
	4.6 Fügen durch Schweißen	DIN 8593-6	4.6.1 Pressverbindungsschweißen
			4.6.2 Schmelzverbindungsschweißen
	4.7 Fügen durch Löten	DIN 8593-7	4.7.1 Verbindungsweichlöten
			4.7.2 Verbindungshartlöten
4.8 Kleben	DIN 8593-8	4.8.1 Kleben mit physikalisch abbindenden Klebstoffen	
		4.8.2 Kleben mit chemisch abbindenden Klebstoffen (Reaktionsklebstoffen)	

<sup>248</sup> DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen, Teil 1-8, Ausgabe: 2003-09

## 13.3 Werkstoffdaten

Die folgenden Werte<sup>249,250,251</sup> in Tabelle 13.2 geben eine Übersicht über ausgewählte Werkstoffdaten relevanter Bremsenwerkstoffe. Abweichungen in Abhängigkeit der Legierungszusammensetzung sind möglich.

Tabelle 13.2: Werkstoffdaten relevanter Bremsenwerkstoffe

	<i>Grauguss</i>	<i>Al-MMC</i>	<i>Al-MMC (20% SiC)</i>	<i>C/C</i>	<i>C/SiC</i>
<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	7,1 - 7,25	2,7 - 3,0	2,8	1,5 - 2,1	2,4
<b>Spezifische Wärmekapazität <math>c_p</math> [kJ/kgK]</b>	0,5 - 0,9	0,8 - 1,2	0,8 - 1,1	0,7 - 2	0,7 - 1,5
<b>Wärmeleitfähigkeit <math>\lambda</math> [W/mK]</b>	36 - 55	92 - 220	180 - 190	12 - 23 (par.) 4 - 8 (senkr.)	20 - 40
<b>Maximale Betriebstemperatur [°C]</b>	700 - 720	≈ 535	< 450	≈ 1600	≈ 1350

<sup>249</sup> Speicher, M. F.: Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremsscheiben, 2003, S. XV

<sup>250</sup> Füller, K.-H.: Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen, 1998, S. 11

<sup>251</sup> Barton, D.: Lightweight Materials for Brake Discs, 2008

## 13.4 Thermisches Simulationsmodell

### 13.4.1 Modellaufbau – Einbindung der Wärmeübergangsmechanismen

Ergänzend zu den Ausführungen in Kapitel 6.1 wird nachfolgend auf die Einbindung der Wärmeübergangsmechanismen in das thermische Simulationsmodell sowie die getroffenen Annahmen eingegangen.

#### 13.4.1.1 Wärmeleitung

Die Berechnung der Wärmeleitung zwischen den Teilsegmenten erfolgt ausgehend von der allgemeinen dreidimensionalen Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung in Gleichung (13.1).<sup>252</sup>

$$a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}_q}{\rho c} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{mit} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (13.1)$$

Aus der Aufteilung der Bremsscheibengeometrie im Modell resultiert eine eindimensionale Betrachtung des Wärmeleitungsproblems, die für den Übergangsbereich zwischen Reibring und Topf lokal auf eine zweidimensionale Betrachtung erweitert wird. Für die Berechnung der Wärmeleitung in den Kühlkanal werden die Kühlrippen in einem Element zusammengefasst und durch einen Gesamtwiderstand abgebildet.

Über die definierten Bezugspunkte der Teilsegmente erfolgt die Kopplung der Elemente. Die Übergänge zwischen den Elementen werden als Wärmeleitwiderstände definiert. Für den Wärmestrom zwischen zwei Segmenten gilt zunächst der folgende allgemeine Zusammenhang.<sup>253</sup>

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (13.2)$$

Der Wärmeleitwiderstand  $R$  zwischen zwei benachbarten Teilsegmenten setzt sich für das Beispiel zweier Reibringsegmente aus zwei in Serie geschalteten Teilwiderständen zusammen (vgl. Abbildung 6.2, Kapitel 6.1.2.2). Die Berechnung der Teilwiderstände  $R_{T,i}$  wird für den vorliegenden geometrischen Modellaufbau auf die beiden Sonderfälle der ebenen Platte (Gleichung (13.3)) und der Zylinderschale (Gleichung (13.4)) zurückgeführt. Der Sonderfall der Zylinderschale gilt für die Berechnung der radialen Wärmeleitung aus den Teilkomponenten des Reibringkörpers in die Topfanbindung. Alle ande-

---

<sup>252</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 122

<sup>253</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 34 ff.

ren Wärmeleitungsmechanismen werden durch den Sonderfall der ebenen Platte abgebildet. Für die Berechnung der Teilwiderstände gelten die nachfolgenden Zusammenhänge.<sup>254</sup>

$$R_{T,i} = \frac{s_{K \rightarrow T,i}}{\lambda_{T,i} \cdot A_{T,i\_Leit}} \quad (13.3)$$

Mit  $s_{K \rightarrow T,i}$ : Abstand der Kontaktfläche  $K$  zwischen beiden Teilkomponenten zum Gitterpunkt der Teilkomponente  $T,i$   
 $\lambda_{T,i}$ : Wärmeleitfähigkeit der Teilkomponente  $T,i$   
 $A_{T,i\_Leit}$ : Vereinfachte wärmeleitende Fläche der Teilkomponente  $T,i$

$$R_{T,i} = \frac{\ln\left(\frac{r_{T,i}}{r_{T,i\_innen}}\right)}{\lambda_{T,i} \cdot 2\pi \cdot L_{T,i}} \quad (13.4)$$

Mit  $r_{T,i}$ : Radius des Gitterpunktes der Teilkomponente  $T,i$   
 $r_{T,i\_innen}$ : Innenradius der Teilkomponente  $T,i$   
 $\lambda_{T,i}$ : Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs der Teilkomponente  $T,i$   
 $L_{T,i}$ : Länge der Zylinderschale der Teilkomponente  $T,i$  (entspr. Dicke)

### 13.4.1.2 Wärmestrahlung

Der Energieaustausch mit der Umgebung durch Wärmestrahlung wird für einen grauen Strahler in einer schwarzen Umgebung durch den in Gleichung (13.5)<sup>255</sup> dargestellten Zusammenhang beschrieben.

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_U^4) \quad (13.5)$$

Für die Identifikation der im Modell zu berücksichtigenden abstrahlenden Oberflächen verdeutlicht Abbildung 13.2 die Einbauposition einer Scheibenbremse im Fahrzeug. Zwischen den Reibringflächen im Kühlkanal wird die Annahme getroffen, dass die Strahlung an der gegenüberliegenden Seite absorbiert und reflektiert wird. Weiterhin werden die Anlageflächen des Brems Scheibentopfes an Radnabe und Felge nicht für die Strahlung berücksichtigt.

Neben der Oberflächengröße hängt die abgestrahlte Wärmemenge vom Emissionsgrad  $\varepsilon$  ab und damit von der Oberflächenbeschaffenheit des Strahlers. Im vorliegenden Modell

<sup>254</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 34 ff.

<sup>255</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 32

werden zwei Fälle unterschieden. Durch die Reibung während der Bremsung erhalten die Reibflächen im Vergleich zu den anderen Oberflächen der Bremsscheibe eine metallisch glänzende und im Idealfall nicht oxidierte Oberfläche. Daraus folgt eine Differenzierung bezüglich der Annahmen der im Modell verwendeten Emissionskoeffizienten  $\varepsilon$ . Für die beiden Reibflächen wird ein Emissionsgrad von  $\varepsilon = 0,3$  angenommen (Literaturwert Guss, poliert:  $\varepsilon \approx 0,2$ ), für alle anderen strahlungsrelevanten Oberflächen wird unter der Annahme einer durch Umgebungseinflüsse teilweise oxidierten Oberfläche ein Emissionsgrad von  $\varepsilon = 0,6$  definiert (Literaturwert Guss, oxidiert:  $\varepsilon > 0,6$ ).<sup>256,257,258</sup>

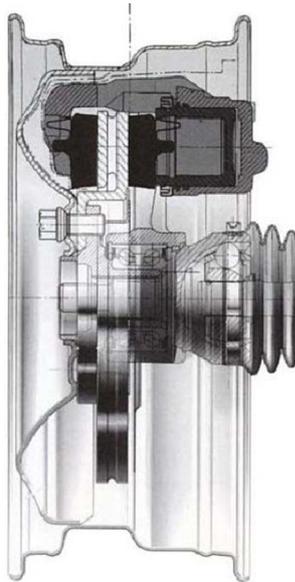


Abbildung 13.2: Einbauverhältnisse einer Scheibenbremse<sup>259</sup>

### 13.4.1.3 Konvektion

Der durch konvektiven Wärmetransport abgegebene Wärmestrom setzt sich anteilig aus freier und erzwungener Konvektion zusammen (vgl. Gleichung (13.6)<sup>260</sup>). Neben der Oberfläche ist der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  von Bedeutung. Eine genaue Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten ist aufgrund der komplexen Randbedingungen und Vielzahl an Einflussfaktoren im Betrieb kaum möglich, so dass entsprechende Abschätzungen und Annahmen getroffen werden, die nachfolgend dargestellt sind.

---

<sup>256</sup> <http://www.thermografie-xtra.de/de/waermebildkamera-tips-tricks-know-how/emissionsgrad-tabelle.html>, abgerufen am 17.08.2012

<sup>257</sup> <http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/emissivity.html>, abgerufen am 17.08.2012

<sup>258</sup> Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure, 2002, S. 214

<sup>259</sup> Eichhorn, U.; Fuhrmann, K. H.: Fahrzeugtechnische Anforderungen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, 2006, S. 30

<sup>260</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 7

Für die vorherrschenden Strömungsverhältnisse wird zunächst von einer Grenzschichtströmung ausgegangen, nach der der Wärmeübergangskoeffizient mathematisch entsprechend Gleichung (13.7)<sup>261</sup> beschrieben werden kann:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T_\infty) \quad (13.6)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_L}{L_{char.}} \cdot Nu \quad (13.7)$$

Die Nusselt-Zahl  $Nu$  ist die charakteristische dimensionslose Kenngröße zur Beschreibung des Wärmeübergangskoeffizienten und unterscheidet sich hinsichtlich der Berechnung für die Fälle freier und erzwungener Konvektion. In der Praxis treten die beiden Arten häufig zusammen auf. Für den vorliegenden Fall wird daher eine kombinierte Nusselt-Zahl  $Nu_{komb}$  verwendet. Da der Luftstrom zur Kühlung der Radbremse im vorderen Bereich vom Boden her in den Radkasten eintritt,<sup>262</sup> wird eine Anströmung von unten erwartet. Daraus leitet sich die Annahme eines gleichgerichteten Auftriebs zur erzwungenen Strömung ab. Für den Fall einer gleichgerichteten Überlagerung freier und erzwungener Konvektion erfolgt die Berechnung der kombinierten Nusselt-Zahl entsprechend Gleichung (13.8).<sup>263</sup>

$$Nu_{komb} = \sqrt[3]{Nu_{erzw}^3 + Nu_{frei}^3} \quad (13.8)$$

Mit  $Nu_{erzw}$ : Nusselt-Zahl der erzwungenen Konvektion  
 $Nu_{frei}$ : Nusselt-Zahl der freien Konvektion

Die mathematischen Annahmen zur Berechnung der Nusselt-Zahlen für die Oberflächen der Bremsscheibe bauen auf den Ergebnissen von Sheridan<sup>264</sup> et al. auf und basieren im vorliegenden Modell auf den beiden geometrischen Spezialfällen einer vertikalen Platte und eines horizontalen Zylinders. Die Berechnungsvorschriften der Nusselt-Zahlen sind Tabelle 13.3 zu entnehmen.

<sup>261</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 20

<sup>262</sup> Hucho; W.-H. (Hrsg.): Aerodynamik des Automobils, 2008

<sup>263</sup> Vgl. Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 2006, S. 431 f.

<sup>264</sup> Sheridan, D. C.; Kutchev, J. A.; Samie, F.: Approaches to the thermal modeling of disk brakes, 1988

Tabelle 13.3: Berechnungsvorschriften der Nusselt-Zahl für freie und erzwungene Konvektion<sup>265,266</sup>

<b>Freie Konvektion</b>	Vertikale Platte	$Nu_{frei\_Platte} = \left[ 0,825 + 0,387 \cdot (Ra \cdot f_l)^{\frac{1}{6}} \right]^2$	$f_l = \left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{16}{9}}$
	Horizontaler Zylinder	$Nu_{frei\_Zyl} = \left[ 0,752 + 0,387 \cdot (Ra \cdot f_l)^{\frac{1}{6}} \right]^2$	$f_l = \left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{16}{9}}$
<b>Erzw. Konvektion</b>	Rotierende Scheibe in parallelem Luftfluss	$Nu_{erzw} = 0,0436 \cdot (Re_0)^{0,8} \cdot \left( \frac{Re_t}{Re_0} \right)^{0,74}$	$Re_0 = \frac{\omega \cdot L_{char.}^2}{\nu}$ $Re_t = \frac{w_\infty \cdot L_{char.}}{\nu}$
	Rotierende Zylindermantelfläche in Luftfluss quer zur Drehachse	$Nu_{erzw} = 0,06 \cdot (2 \cdot Re_0^2 + 4 \cdot Re_t^2)^{0,33}$	$\omega$ : Winkelgeschwindigkeit Scheibe / Zylinder $w_\infty$ : Anströmgeschwindigkeit $L_{char.}$ : char. problembez. Länge $\nu$ : kin. Viskosität Luft

Die zur Berechnung der erzwungenen Konvektion erforderliche charakteristische Länge  $L_{char}$  entspricht im Fall der vertikalen Platte der Plattenhöhe, im Fall des horizontalen Zylinders ist sie gleich dem halben Zylinderumfang. Die Anströmgeschwindigkeit  $w_\infty$  hängt stark von den Bauraumverhältnissen und der Geometrie im Bereich des Radhauses und der Radbremse sowie der resultierenden Radhausströmung ab.<sup>267</sup> Nach Sheridan<sup>268</sup> kann ein proportionaler Zusammenhang zwischen Anström- und Fahrzeuggeschwindigkeit angenommen werden.

Die bisher getroffenen Annahmen haben Gültigkeit für die Teilstimente mit Ausnahme des Kühlkanals. Aufgrund der komplexen Geometrie und Strömungsverhältnisse sind nicht alle Annahmen auf den Kühlkanal übertragbar. Analog zu den anderen Bremscheibensegmenten wird auch im Kühlkanal von einer überlagerten Konvektion ausgegangen. Eine eindeutige Rückführung der Kühlrippengeometrie auf eine vereinfachte geometrische Darstellung zur Berechnung der Nusselt-Zahl ist aufgrund der Rotation der Bremscheibe nicht möglich. Die Oberflächen durchlaufen während einer Umdrehung sowohl den Zustand einer vertikalen Platte als auch einer horizontalen Platte.

<sup>265</sup> Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas, 2006, Fa2, Fe3

<sup>266</sup> Sheridan, D. C.; Kutchev, J. A.; Samie, F.: Approaches to the thermal modeling of disk brakes, 1988, S. 3

<sup>267</sup> Schütz, T.: Ein Beitrag zur Berechnung der Bremsenkühlung an Kraftfahrzeugen, 2009, S. 14 f.

<sup>268</sup> Sheridan, D. C.; Kutchev, J. A.; Samie, F.: Approaches to the thermal modeling of disk brakes, 1988, S. 3

Aufgrund der Rotationssymmetrie wird von einer Gleichverteilung beider Fälle ausgegangen, so dass im Modell der Mittelwert beider Nusselt-Zahlen als Referenzwert verwendet wird. Die Nusselt-Zahl für erzwungene Konvektion ergibt sich nach dem Zusammenhang für einen durchströmten Kanal entsprechend Gleichung (13.9).<sup>269</sup>

$$Nu_{turb} = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{D_{Kanal}}{L_{Kanal}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (13.9)$$

$$\text{mit } \xi = [1,8 \cdot \log_{10}(Re) - 1,5]^{-2}$$

Die Berechnung der Nusselt-Zahl an den außen- und innenliegenden Oberflächen der Kühlrippen erfolgt analog zu den Mantelflächen der Reibringsegmente und kann durch den Fall der rotierenden Zylindermantelfläche (vgl. Tabelle 13.3) abgebildet werden.

Die Strömungsverhältnisse der Luft innerhalb des Kühlkanals bilden einen wesentlichen Einflussfaktor auf den konvektiven Wärmetransport. Die Durchströmung des Kühlkanals erfolgt über weite Umfangswinkelbereiche von innen nach außen, kann jedoch lokal über die einzelnen Kanäle variieren.<sup>270</sup> Abbildung 13.3 zeigt schematisch die Strömungsverhältnisse an der Brems Scheibe. Für die Modellbildung wird vereinfacht über alle Kühlkanäle von gleichen Strömungsverhältnissen ausgegangen. Die Strömungsgeschwindigkeit  $v_{Kühl\_avg}$  innerhalb der Kanäle wird auf Basis der Untersuchungen von Sisson<sup>271</sup> entsprechend Gleichung (13.10) abgeschätzt.

$$v_{Kühl\_avg} = \omega \cdot D_0 \cdot \sqrt{-0,0201 + (0,2769 \cdot D_I) - (0,0188 \cdot D_I^2)} \quad (13.10)$$

Mit  $v_{Kühl\_avg}$ : Durchschnittl. Geschwindigkeit Luftstrom im Kühlkanal in m/s  
 $\omega$ : Drehgeschwindigkeit der Brems Scheibe in rad/s  
 $D_0$ : Außendurchmesser des Reibrings in m  
 $D_I$ : Innendurchmesser des Reibrings in m

<sup>269</sup> Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas, 2006, Ga5

<sup>270</sup> Schütz, T.: Ein Beitrag zur Berechnung der Bremsenkühlung an Kraftfahrzeugen, 2009, S. 15

<sup>271</sup> Sisson, A. E.: Thermal Analysis of Vented Brake Rotors, 1978

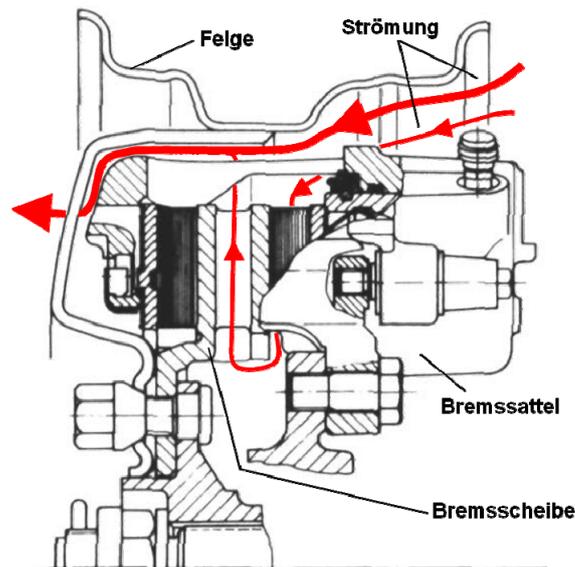


Abbildung 13.3: Schematische Darstellung der An- und Durchströmung einer belüfteten Bremsscheibe<sup>272</sup>

Die im Modell verwendeten Materialkonstanten unterliegen einer Abhängigkeit von der Temperatur. Die Temperaturabhängigkeit der dimensionslosen Kenngrößen und Stoffwerte für Luft sind der Literatur entnommen.<sup>273</sup> Auf Werkstoffseite liegen nur für Grauguss die temperaturabhängigen Werkstoffkenngrößen vor. Sie sind den Analyseergebnissen des Projektpartners entnommen.<sup>274</sup>

---

<sup>272</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an: Schütz, T.: Ein Beitrag zur Berechnung der Bremsenkühlung an Kraftfahrzeugen, 2009, S. 16 und Burckhardt, M.: Fahrwerktechnik: Bremsdynamik und Pkw-Bremsanlagen, 1991, S. 228

<sup>273</sup> Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas, 2002, Kapitel Dbb (Tabelle 1)

<sup>274</sup> Schwäbische Hüttenwerke Automotive AG

### 13.4.2 Modellprüfung – Gewähltes Versuchsszenario

Abbildung 13.4 zeigt exemplarisch den Geschwindigkeitsverlauf des gewählten Versuchsszenarios mit dem dazugehörigen Temperaturprofil der Reibringoberfläche.

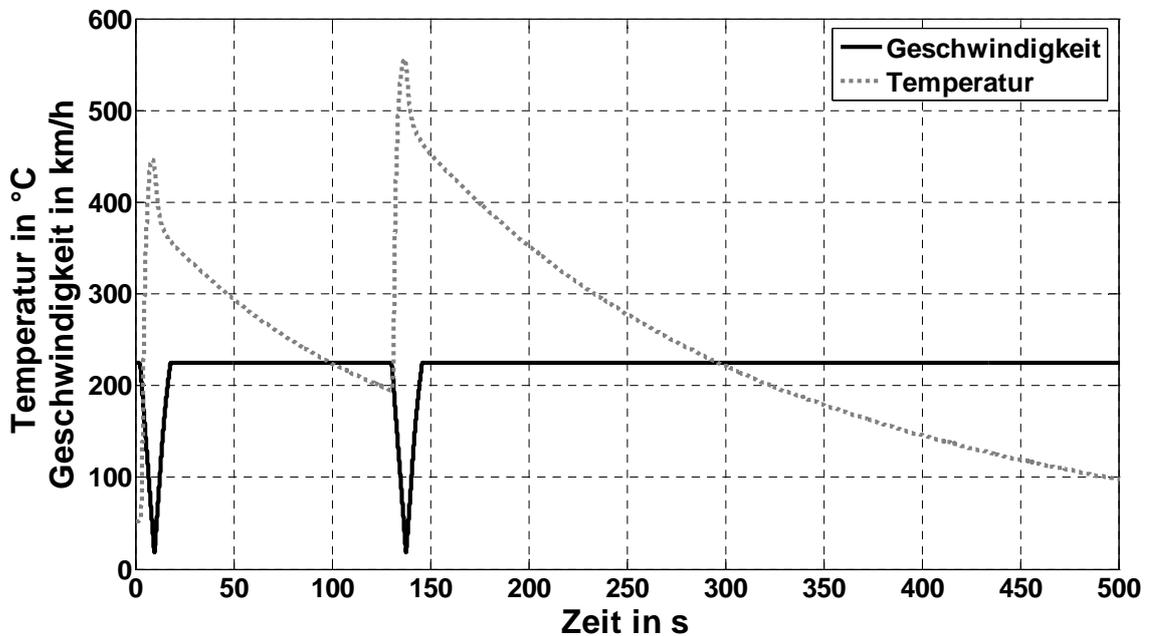


Abbildung 13.4: Geschwindigkeitsprofil mit Temperaturverlauf an der Reibringoberfläche für zwei aufeinanderfolgende Verzögerungen (Doppelstopp)

Die das Bremszenario beschreibenden relevanten Parameter und Randbedingungen sind in Tabelle 13.4 zusammengefasst. Diese bilden zugleich auch die Eingangsgrößen für das thermische Modell. Für die Überprüfung der thermodynamischen Prozesse werden die Temperaturverläufe an verschiedenen Positionen der Brems Scheibe hinsichtlich der auftretenden maximalen Temperaturen sowie des Abkühlungsverhaltens analysiert.

Tabelle 13.4: Fahrzeugdaten und Versuchsparameter der Versuche zur Modellüberprüfung

<b>Fahrzeugdaten</b>	
Fahrzeugmasse	2.700 kg
Bremsscheibendimension	Ø360x34
Anteil Bremskraft VA (statisch)	68,9 %
<b>Versuchsparameter und Randbedingungen</b>	
Ausgangs-/ Endgeschwindigkeit	225 km/h / 20 km/h
Verzögerung (Bremsmoment)	8 m/s <sup>2</sup> ( $M_{Brems} \approx 2450 \text{ Nm}$ )
Kühlluft-Volumenstrom	3.500 m <sup>3</sup> /h
Temperatur Kühlluft	$\approx 20 \text{ °C}$ (Umgebungstemperatur)

### 13.4.3 Parameteranalyse – Gewählte Versuchsszenarien

Für die in Kapitel 6.2 durchgeführte Parameteranalyse sowie die thermische Auslegung der Hybrid-Bremsscheibe in Kapitel 10.2 sind nachfolgend die Parameter der gewählten Versuchsszenarien dokumentiert.

#### Stoppbremsung

Tabelle 13.5: Fahrzeugdaten und Versuchsparameter der Stoppbremsung

<b>Fahrzeugdaten</b>	
Fahrzeugmasse	2.356 kg
Bremsscheibendimension	Ø320x30
Anteil Bremskraft VA (statisch)	66,7 %
<b>Angenommene Randbedingungen</b>	
Ausgangs-/ Endgeschwindigkeit	250 km/h / 20 km/h
Verzögerung (Bremsmoment)	8 m/s <sup>2</sup> ( $M_{Brems} \approx 2450 \text{ Nm}$ )
Kühlluft-Volumenstrom	3.500 m <sup>3</sup> /h
Temperatur Kühlluft	≈ 20 °C (Umgebungstemperatur)

#### Großglockner-Passabfahrt

Tabelle 13.6: Fahrzeugdaten und Versuchsparameter Großglockner-Passabfahrt (Haltebremsung)

<b>Fahrzeugdaten</b>	
Fahrzeugmasse	2.356 kg
Bremsscheibendimension	Ø320x30
Anteil Bremskraft VA (statisch)	66,7 %
<b>Angenommene Randbedingungen</b>	
Geschwindigkeit	50 km/h (konstant)
Höhenunterschied / Länge Passabfahrt <sup>275</sup>	1.426 m / 14.300 m
$c_w$ -Wert / Stirnfläche (jeweils abgeschätzt)	0,3 / 2,5 m <sup>2</sup>
Rollwiderstandsbeiwert (Abschätzung)	0,01
Dichte Luft	1,2 kg/m <sup>3</sup>
Kühlluft-Volumenstrom	3.500 m <sup>3</sup> /h
Temperatur Kühlluft	≈ 20 °C (Umgebungstemperatur)

<sup>275</sup> Burckhardt, M.: Fahrwerktechnik: Bremsdynamik und Pkw-Bremsanlagen, 1991, S. 359

### 13.4.4 Parameteranalyse – Gesamtdarstellung der Ergebnisse<sup>276,277,278</sup>

#### Variation der Wärmeleitfähigkeit

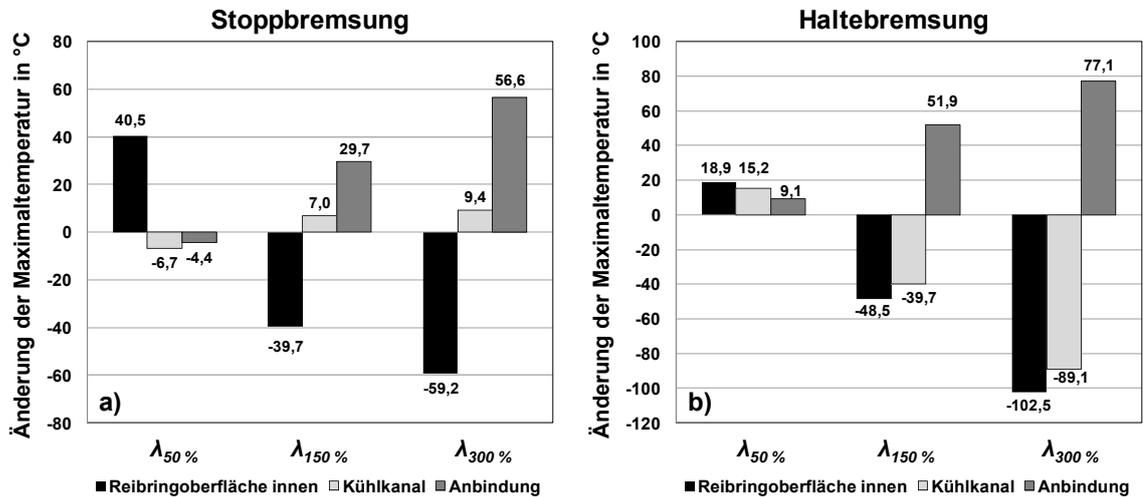


Abbildung 13.5: Temperaturverteilung in der Bremsscheibe bei Variation der Wärmeleitfähigkeit des Bremsscheibenwerkstoffs: a) Stoppbremsung; b) Haltebremsung

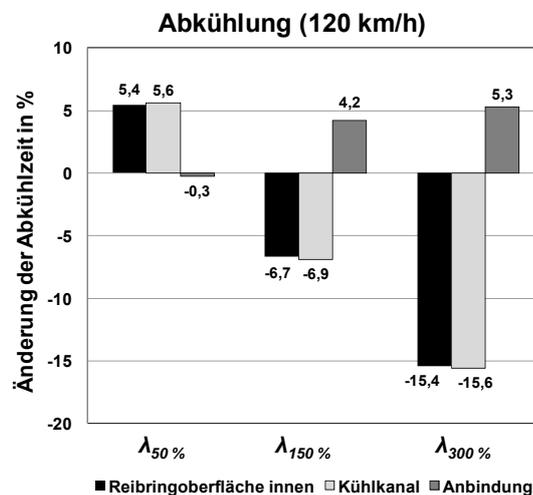


Abbildung 13.6: Abkühlzeit der Bremsscheibe bei variabler Wärmeleitfähigkeit

<sup>276</sup> Referenztemperaturen (100 %) Stoppbremsung: Reibringoberfläche innen (455,4 °C); Kühlkanal (361,8 °C); Anbindung (142,4 °C)

<sup>277</sup> Referenztemperaturen (100 %) Haltebremsung: Reibringoberfläche innen (646,0 °C); Kühlkanal (625,2 °C); Anbindung (284,8 °C)

<sup>278</sup> Referenzabkühlzeiten (100 %): Reibringoberfläche innen (552 s); Kühlkanal (551 s); Anbindung (359 s)

Variation der spezifischen Wärmekapazität

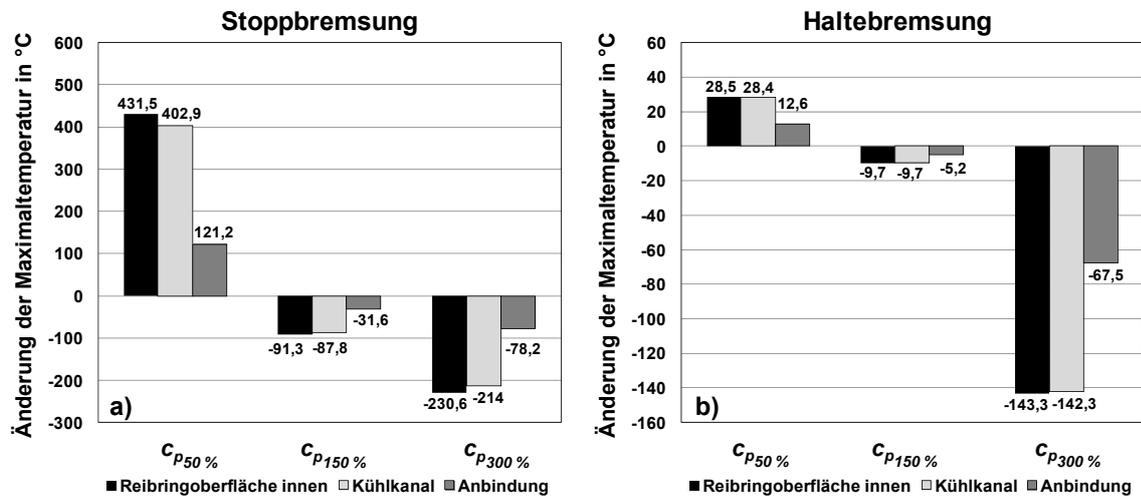


Abbildung 13.7: Temperaturverteilung in der Bremsscheibe bei Variation der spezifischen Wärmekapazität des Bremsscheibenwerkstoffs: a) Stoppbremsung; b) Haltebremsung

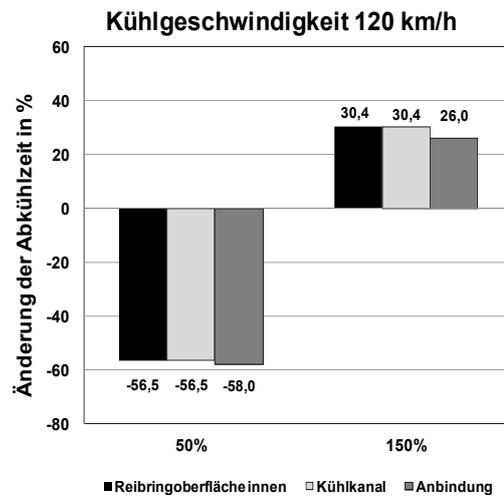


Abbildung 13.8: Abkühlzeit der Bremsscheibe bei variabler spezifischer Wärmekapazität

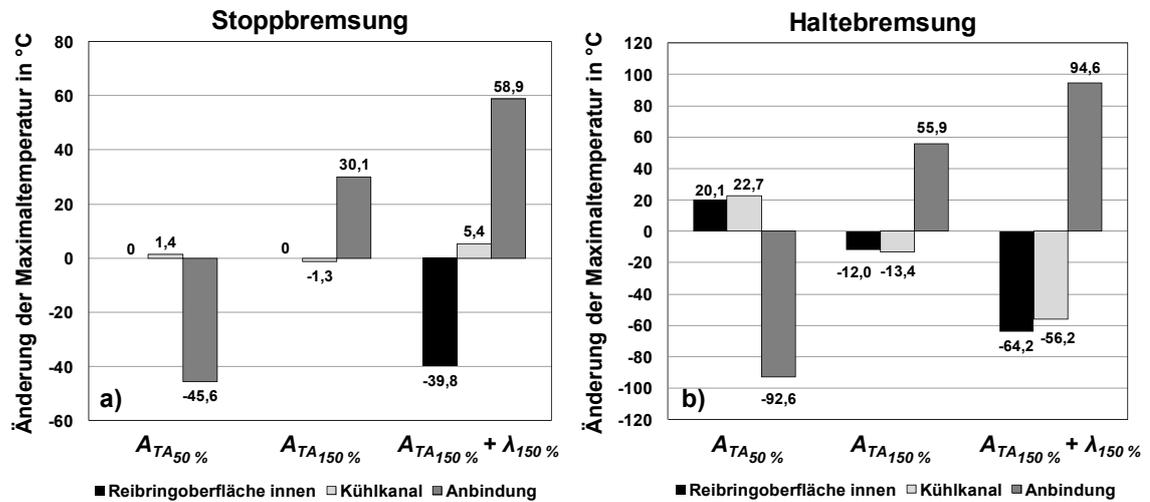
Querschnittsfläche Topfanbindung

Abbildung 13.9: Temperaturverteilung in der Bremsscheibe bei Variation der Querschnittsfläche der Anbindung zwischen Reibringkörper und Topf: a) Stoppbremsung; b) Haltebremsung

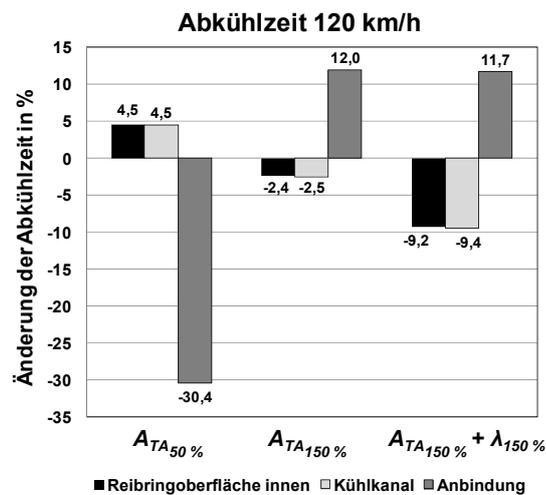


Abbildung 13.10: Abkühlzeit in der Bremsscheibe bei variabler Querschnittsfläche der Anbindung zwischen Reibringkörper und Topf

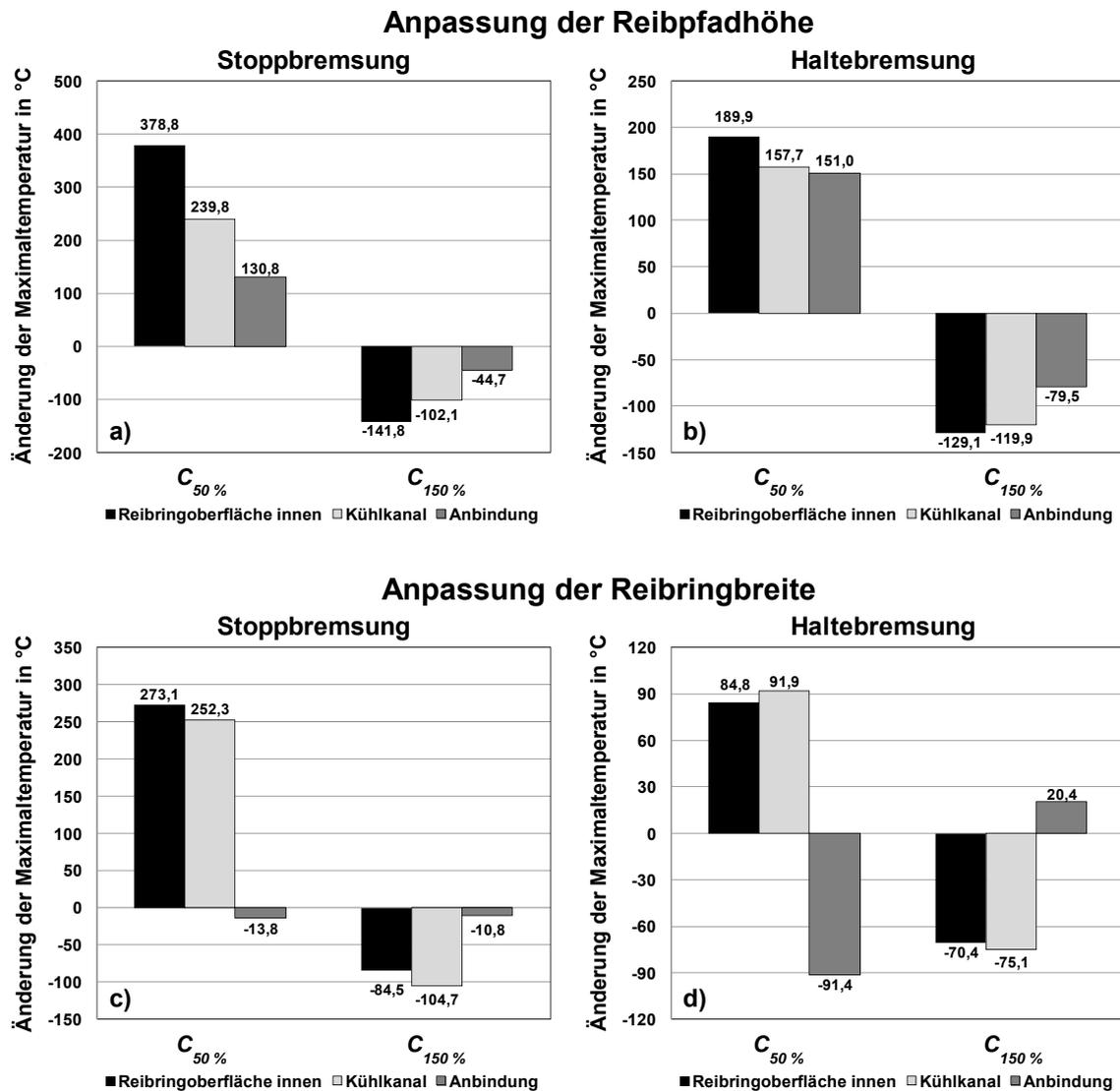
Reibpfadhöhe vs. Reibringbreite

Abbildung 13.11: Änderung der Maximaltemperatur in der Bremsscheibe bei Variation der Reibpfadhöhe im Vergleich zur Variation der Reibringbreite: a) Stoppbremsung (Var. Reibpfadhöhe); b) Haltebremsung (Var. Reibpfadhöhe); c) Stoppbremsung (Var. Reibringbreite); d) Haltebremsung (Var. Reibringbreite)

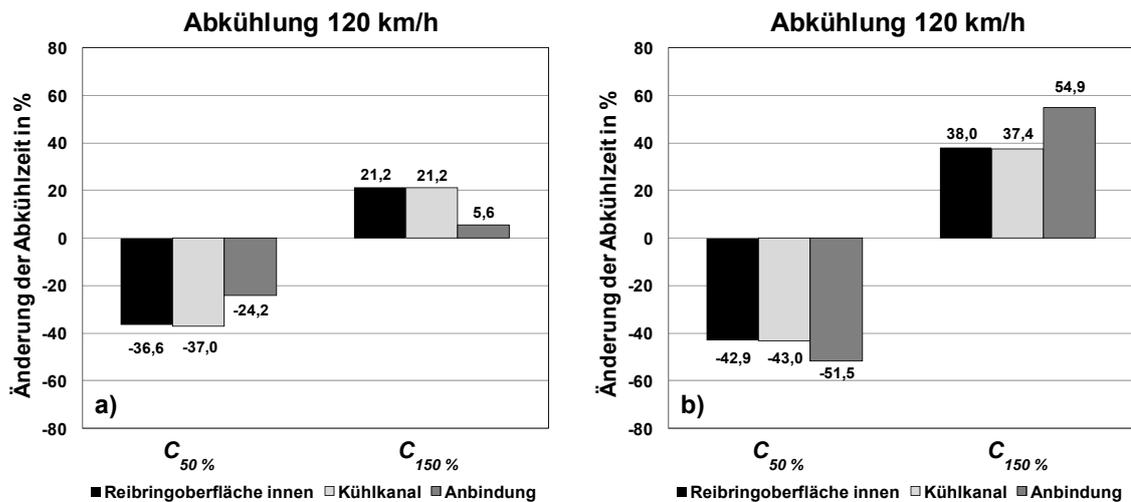


Abbildung 13.12: Abkühlzeit in der Bremsscheibe bei Variation der Reibpfadhöhe im Vergleich zur Variation der Reibringbreite: a) Variation Reibpfadhöhe; b) Variation Breite Reibringkörper

### Wärmeübergang im Kühlkanal

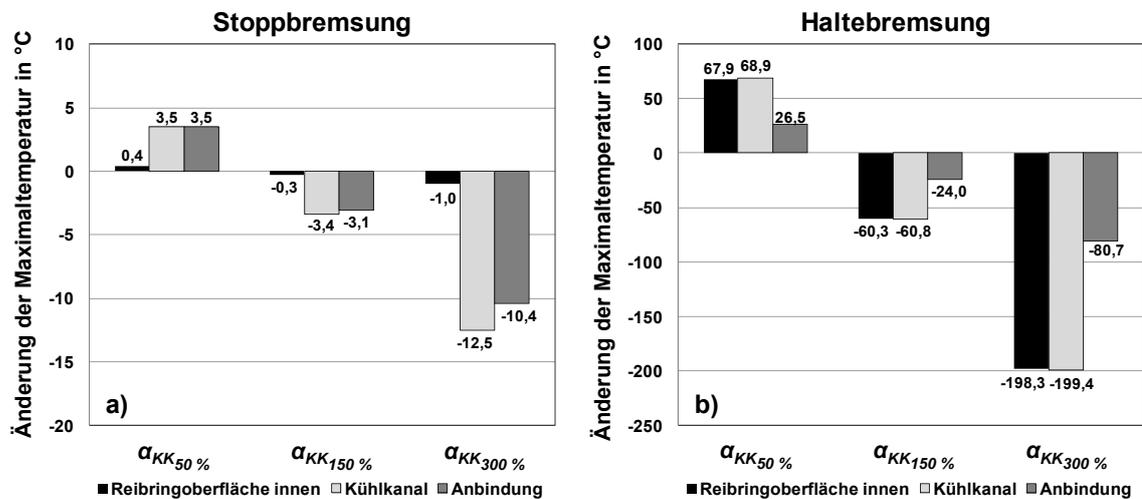


Abbildung 13.13: Temperaturverteilung in der Bremsscheibe bei Änderung des Wärmeübergangs im Kühlkanal: a) Stoppbremsung; b) Haltebremsung

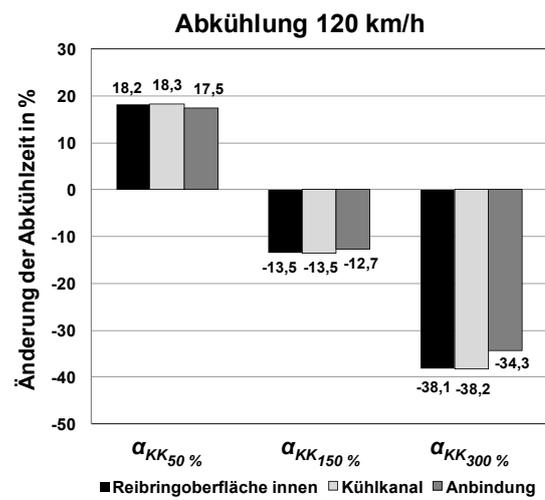


Abbildung 13.14: Abkühlzeit in der Bremsscheibe bei Variation des Wärmeübergangs  $\alpha_{KK}$  im Kühlkanal

### 13.4.5 Modellerweiterung für die reibgeschweißte Leichtbau-Bremsscheibe

Für eine thermische Simulation der reibgeschweißten Bremsscheibe wird das in Kapitel 6.1 beschriebene Simulationsmodell um das Funktionsblech erweitert. Die Modellanpassung ist schematisch in Abbildung 13.15 dargestellt. Im Vergleich zur Modellarchitektur einer einteiligen Bremsscheibe erfolgt eine Unterteilung des Kühlkanals auf zwei Komponenten. Das Funktionsblech ist ebenfalls zweigeteilt in einen oberen Teil im Kühlkanal und einen unteren Teil im Bereich der Anbindungszone.

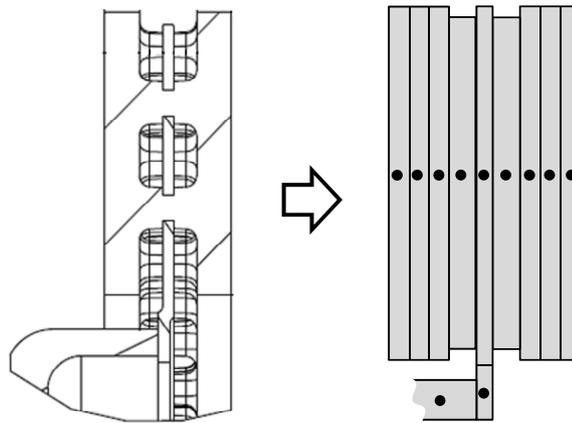


Abbildung 13.15: Schnittansicht der reibgeschweißten Leichtbau-Bremsscheibe (links), schematische Umsetzung mit Einzelkomponenten im Modell (rechts)

## 13.5 Versuchsbedingungen

### 13.5.1 Eingesetzte Bremsenprüfstände

Tabelle 13.7: Leistungsdaten des Schwungmassenprüfstands der Fa. Schwäbische Hüttenwerke Automotive AG<sup>279</sup>

Leistungsdaten	
GS-Motor, Antriebsleistung:	$P = 250 \text{ kW}$
max. Bremsmoment:	$M_{B_{\text{Brem}, \text{max}}} = 5.000 \text{ Nm}$
Dauerschleppmoment:	k.A.
max. Drehzahl:	$n_{\text{max}} = 2.800 \text{ min}^{-1}$
max. Bremsdruck:	$p_B = 250 \text{ bar}$
max. Druckaufbaugradient:	k.A.
max. Schwungmasse:	$\theta_{\text{max}} = 160 \text{ kgm}^2$
Kühlluftstrom, variabel:	$dV/dt \approx 4.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Tabelle 13.8: Leistungsdaten des Schwungmassenprüfstands an der TU Darmstadt

Leistungsdaten	
Leistung:	$P = 131 \text{ kW}$
max. Bremsmoment:	$M_{B_{\text{Brem}, \text{max}}} = 6.000 \text{ Nm}$
Dauerschleppmoment:	$M_S = 800 \text{ Nm}$
max. Drehzahl:	$n_{\text{max}} = 2.400 \text{ min}^{-1}$
max. Bremsdruck:	$p_B = 250 \text{ bar}$
max. Druckaufbaugradient:	$dp/dt = 500 \text{ bar/s}$
max. Schwungmasse:	$\theta_{\text{max}} = 187,5 \text{ kgm}^2$
Zu-/Abluft:	$dV/dt = 3.500 / 3.700 \text{ m}^3/\text{h}$

<sup>279</sup> Schwäbische Hüttenwerke Automotive AG

### 13.5.2 Versuchsparameter der verwendeten Prüfzenarien

Tabelle 13.9: Versuchsparameter der für die Validierung gewählten Bremsszenarien

	Überlastprüfung		Thermische Rissbeständigkeit	Thermische Verformung	
	Einzelstopp	Doppelstopp		Einzelstopp	Doppelstopp
<b>Geschwindigkeit Versuchsstart</b>	$v_{max}$	$v_{max}$	$v_{max}$	$v_{max}$	$0,9 \cdot v_{max}$
<b>Geschwindigkeit Versuchsende</b>	20 km/h	20 km/h	20 km/h	20 km/h	20 km/h
<b>Verzögerung</b>	13 m/s <sup>2</sup>	10 m/s <sup>2</sup>	5 m/s <sup>2</sup>	9,8 m/s <sup>2</sup>	8 m/s <sup>2</sup>
<b>Bremungen pro Zyklus</b>	1	2 (60 s / Intervall)	2 (120 s / Intervall)	1	2 (60 s / Intervall)
<b>Anzahl der Zyklen</b>	20	20	bis Versagen eintritt	1	2
<b>Starttemperatur Reibringoberfläche</b>	100 °C		100 °C	50 °C	
<b>Versagens- / Untersuchungskriterium</b>	Risse in der Anbindungszone oder Durchriss		Zyklusanzahl: Eine Bremsscheibe: > 500 Alle weiteren: > 250	max. Schirmung und max. Erhöhung der plastischen Planlaufabweichung	

## 13.6 Vereinfachtes Prozessschaubild der umformend hergestellten Leichtbau-Bremsscheibe

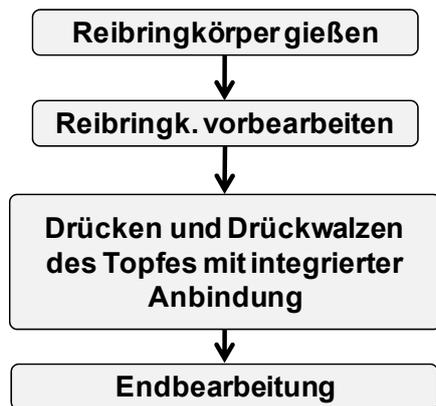


Abbildung 13.16: Vereinfachte Prozessübersicht umformend hergestellte Leichtbau-Bremsscheibe

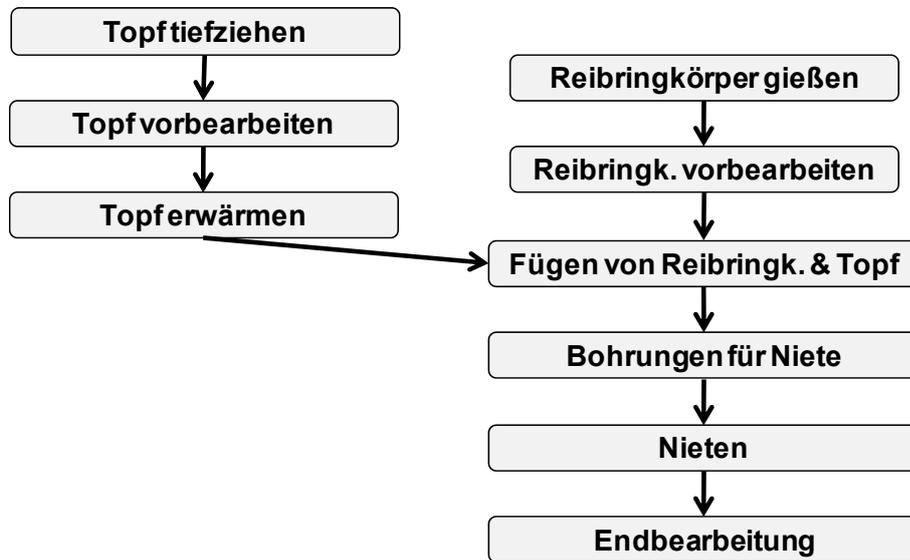


Abbildung 13.17: Vereinfachte Prozessübersicht genietet Leichtbau-Bremsscheibe

## 13.7 Ergänzende Versuchsergebnisse zur Hybrid-Bremsscheibe

### Luftspalteinfluss auf das thermische Verhalten einer Hybrid-Bremsscheibe

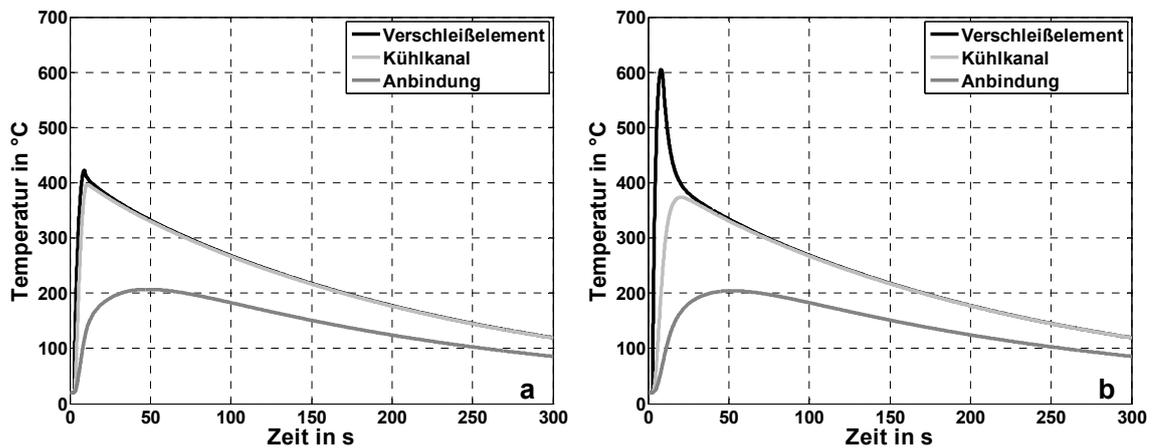


Abbildung 13.18: Einfluss eines Luftspalts zwischen Verschleißelement und Grundkörper auf die Temperaturverteilung in einer Hybrid-Bremsscheibe – a) Hybrid-Bremsscheibe ohne Luftspalt, b) Hybrid-Bremsscheibe mit Luftspalt (1/100 mm)

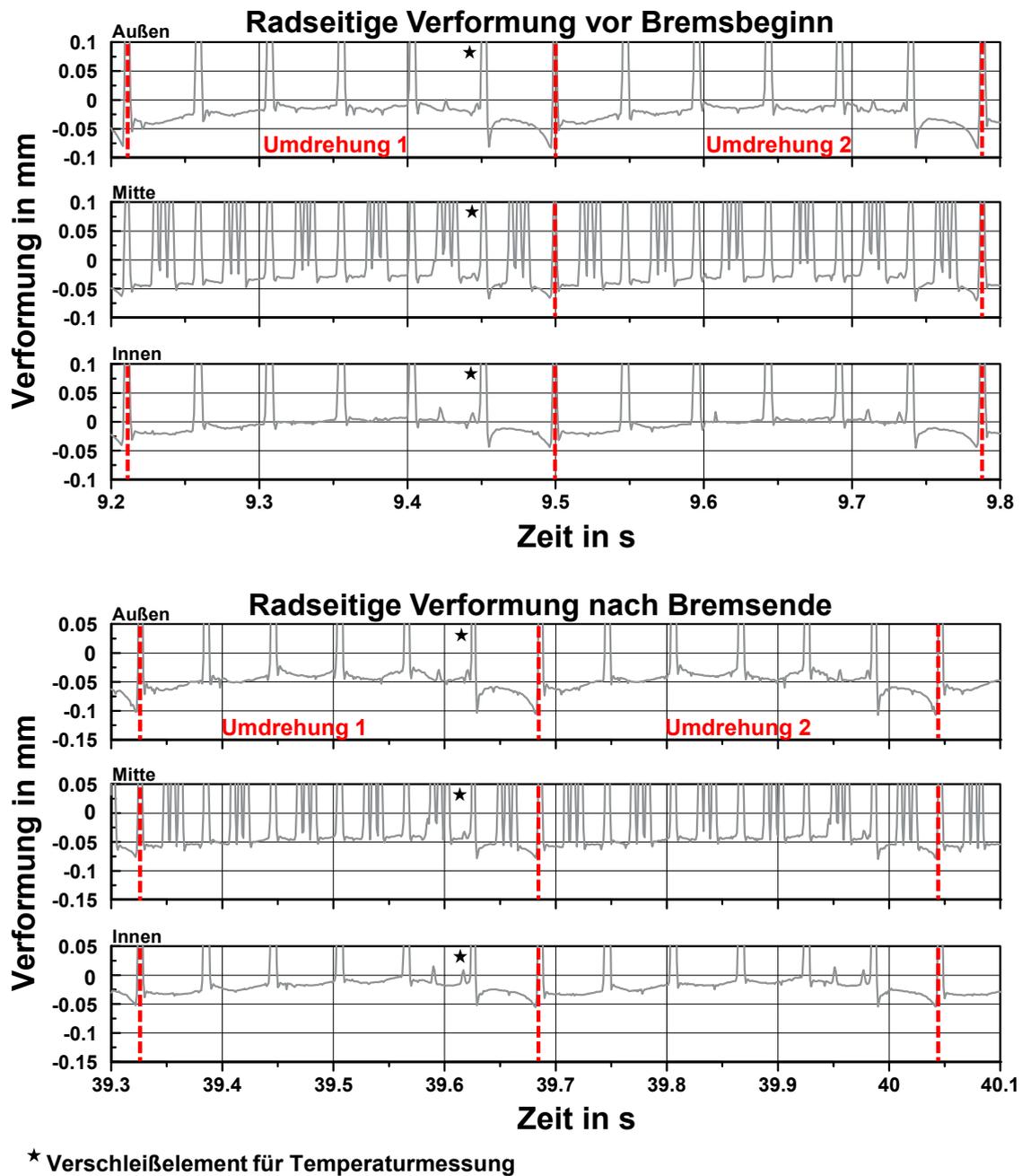
Radseitige Verformung der Hybrid-Bremsscheibe

Abbildung 13.19: Radseitige Verformung der Hybrid-Bremsscheibe unmittelbar vor (oben) und nach der Bremsung (unten) für alle drei Radien

## Literaturverzeichnis

- Alsaif, M. A. / Dahm, K. L. / Shrestha, S. / Dearnley, P. A. / Barton, D. C.:** Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) treated aluminium metal matrix composite rotors for lightweight automotive brakes. In: 6th European Conference on Braking, Lille, Frankreich, 24./25. November 2010
- Amtsblatt der Europäischen Union:** Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, 2009
- Baehr, H. D. / Stephan, K.:** Wärme- und Stoffübertragung, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006
- Barton, D.:** Lightweight Materials for Brake Discs. In: Innovative Braking 2008 – Workshop C, Frankfurt, 2008
- Baumgartner, J. / Pahle, W. / Iraschko, J.:** Bremsscheibe, insbesondere für ein Fahrzeug. Europäische Patentschrift EP 1 859 178 B1, 2011
- Beffort, O.:** Metallmatrix-Verbundwerkstoffe: Eigenschaften, Anwendungen und Bearbeitung. In: Feinstbearbeitung technischer Oberflächen - 6. Internationales IWF-Kolloquium, Egerkingen, Schweiz, 18./19. April 2002
- Birkhofer, H.:** Skriptum zur Vorlesung Produktentwicklung I. 2005, Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente an der Technischen Universität Darmstadt
- Blau, P. J. / Jolly, B. C. / Qu, J. / Peter, W. H. / Blue, C. A.:** Tribological investigation of titanium-based materials for brakes. In: Wear 263 (2007), S. 1202–1211, 2007
- Bönning, M.:** Konzepte zur Optimierung von Pkw-Rädern. In: rad.tech, München, 13./14. Juni 2002
- Bosch-Presse:** Pressebild-Nr. 1-CB-17869 zu Presse-Information PI7490 aus [www.bosch-presse.de](http://www.bosch-presse.de)
- Breuer, B. / Bill, K. H. (Hrsg.):** Bremsenhandbuch – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik. ATZ/MTZ-Fachbuch, 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006

- Brunner, H.; Koch, L.:** Schwingungen und Geräusche. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik. ATZ/MTZ-Fachbuch, 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006
- Burckhardt, M. / Reimpell, J. (Hrsg.):** Fahrwerktechnik: Bremsdynamik und Pkw-Bremsanlagen. Vogel-Fachbuch, 1. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg, 1991
- Cayron, C.:** TEM study of interfacial reactions and precipitation mechanisms in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> short fiber or high volume fraction SiC particle reinforced Al-4Cu-1Mg-0.5Ag squeeze-cast composites. Ph.D thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000
- Cueva, G. / Sinatora, A. / Guesser, W. L. / Tschiptschin, A. P.:** Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors. In: Wear 255 (2003), S. 1256–1260, 2003
- Degenstein, T.:** Kraftmessung in Scheibenbremsen. Dissertation TU Darmstadt, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 655, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007
- Dilthey, U.:** Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006
- DIN 8580:** Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. 2003
- DIN 8593:** Fertigungsverfahren Fügen – Teil 0 bis Teil 8. 2003
- DIN EN ISO 15620:** Schweißen – Reibschweißen von metallischen Werkstoffen. 2000
- Dreilich, L. / Pankau, J. / Schmeling, H.-J.:** Analyse und Optimierung von Brems-scheibendeformationen unter Temperaturbelastung. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 94 (1992) S. 34–42, 1992
- Dwivedi, R.:** Performance of MMC rotors in dynamometer testing (SAE-Paper 940848). In: SAE-International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, United States, 28. Februar 1994
- Eckstein, L. / Göbbels, R. / Goede, M. / Laue, T. / Wohlecker, R.:** Analyse sekundärer Gewichtseinsparpotenziale in Kraftfahrzeugen. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 01/2011, 113. Jahrgang, S. 68–76, 2011
- Eichhorn, U. / Fuhrmann, K. H.:** Fahrzeugtechnische Anforderungen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik. ATZ/MTZ-Fachbuch, 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006
- Elises:** Internetseite – Lotus S1 Braking System (URL: <http://www.elises.co.uk/components/s1/brakes/index.html>, abgerufen am 26.02.2012)

- Engel, H.-G.:** Bremscheiben aus Keramik – reif für die Serie? In: *brems.tech*, München, 12./13. Dezember 2002
- Fahrenwaldt, H. J. / Schuler, V.:** Praxiswissen Schweißtechnik. Vieweg Praxiswissen, 2. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006
- Friedrich, H. E.:** Leichtbau und Werkstoffinnovationen im Fahrzeugbau. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 3/2002, 104. Jahrgang, S. 258–266, 2002
- Fritz, A. H. / Schulze G. (Hrsg.):** Fertigungstechnik. 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008
- Füller, K.-H.:** Tribologisches, mechanisches und thermisches Verhalten neuer Bremswerkstoffe in Kfz-Scheibenbremsen. Dissertation Universität Stuttgart, 1998
- Füllgrabe, F. / Winner, H. / Kiefer, A. / Fischer, S. / Hoffmann, I.:** Simulative Analysis and Experimental Investigation of Innovative Lightweight Brake Discs. 6th European Conference on Braking, Lille, Frankreich, 2010
- Grieve, D. G. / Barton, D. C. / Crolla, D. A. / Buckingham, J. T.:** Design of a lightweight automotive brake disc using finite element and Taguchi techniques. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* Vol. 212, S. 245–254, 1998
- Grieve, D. / Barton, D. C. / Crolla, D. A. / Buckingham, J. B. / Chapman, J.:** Investigation of Light Weight Materials for Brake Rotor Applications. In: *The Institute of Materials, Materials for lean weight vehicles*, S. 63–72, 1995
- Güther, H.-M. / Wüllner, A.:** Optimierung des Kühlkanal Designs von Carbon-Keramik-Bremsen. In: *XXV. Internationales  $\mu$ -Symposium – Bremsen-Fachtagung*, Bad Neuenahr, 17./18. Juni 2005, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 597, VDI-Verlag Düsseldorf, S. 24–40, 2005
- Habenicht, H.:** Radbremse. Patentschrift DE 101 54 333 B4. 2001
- Heißing, B. / Ersoy, M. (Hrsg.):** Fahrwerkhandbuch – Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven. *Fahrdynamik*. 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007
- Hering, E. / Martin, R. / Stohrer, M.:** Physik für Ingenieure. 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2002
- Hoffmann, I. / Füllgrabe, F. / Winner, H.:** Die Zukunft der Bremscheibe im Umfeld des Leichtbaus. TMD Friction GmbH, Leverkusen VDI Verlag, Düsseldorf, 2010, *XXVI. Internationales  $\mu$ -Symposium 2010*, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 728

**Hornbogen, E. / Eggeler, G. / Werner, E.:** Werkstoffe. 9. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008

**Hucho, W.-H. (Hrsg.):** Aerodynamik des Automobils – Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort. 5. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2008

**Innobrake:** Internetseite – Das Grundprinzip der Sheet-Cast-Disc. (URL: <http://www.innobrake.de/pages/das-grundprinzip/die-sheet-cast-disc/innovation.php>, abgerufen am 13.02.2012)

**Jang, G. H. / Cho, K. H. / Park, S. B. / Lee, W. G. / Hong, U. S. / Jang, H.:** Tribological Properties of C/C-SiC Composites for Brake Discs. *Metals and Materials International*, Vol. 16, No. 1 (2010), S. 61–66, 2010

**Juettner, R.:** Berechnung der thermischen Belastung einer Bremsscheibe mit der Finite-Elemente-Methode. In: AUTECH 88 – Internationale Kongress-Messe für Automobil-Technik, Sindelfingen, 19./21. Oktober 1988, 1988

**Kaiser, R.:** Sheet Cast – Erprobungsbericht SCD Evo 6.3. Firmenunterlage SHEET CAST Technologies GmbH. (URL: [http://www.sheetcast.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=40&Itemid=572012](http://www.sheetcast.de/index.php?option=com_content&view=article&id=40&Itemid=572012), abgerufen am 15.03.2013)

**Kevorkijan, V. M. / Dragojevič, V. / Smolar, T. / Lenarčič, D.:** A brake disc in Al-based composite. In: *Materiali in Tehnologije* 36 (2002), 2002

**Klein, B.:** Leichtbau-Konstruktion. 8. Auflage, Vieweg & Teubner/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009

**Klocke, F. / König, W.:** Fertigungsverfahren 4. 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006

**Kraft, K. / Körner, M. / Repmann, C.:** Innenbelüftete Bremsscheibe. Offenlegungsschrift DE 10 2005 033 352 A1, 2005

**Krempaszky, C. / Lippmann, H.:** Frictionally Excited Thermoelastic Instabilities of Annular Plates Under Thermal Pre-Stress. In: *Journal of Tribology*, October 2005, Vol. 127, 2005

**Krenkel, W. (Hrsg.):** Keramische Verbundwerkstoffe. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003

**Krinke, S. / Koffler, C.:** Automobil Leichtbau unter Einbezug des gesamten Lebenszyklus. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 06/2010, 112. Jahrgang, S. 438–445, 2010

- Lathwesen, H.:** SHEET CAST Disc – Innovation durch Funktionsintegration. Firmenunterlage SHEET CAST Technologies GmbH. (URL: [http://www.sheetcast.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=40&Itemid=572012](http://www.sheetcast.de/index.php?option=com_content&view=article&id=40&Itemid=572012), abgerufen am 15.03.2013)
- Leber, M.:** Radbremse mit mechatronischer Kennwertregelung – Untersuchung von Betriebsverhalten und Fahreranbindungsproblematik hinsichtlich Brake-by-Wire-Systemen. Dissertation TH Darmstadt, VDI-Fortschrittberichte Reihe 12 Nr. 358, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998
- Macnaughtan, M. P. / Krosnar, J. G.:** Cast Iron – a brake disc material for the future? In: 2<sup>nd</sup> International Seminar on Automotive Braking, University of Leeds, Leeds, UK, 14./15. Mai 1998
- Mayer, R.:** Bremseninduzierte Schwingungen am Kraftfahrzeug. Dissertation TU München, 2007
- Mayer, R.:** Eine neue Generation von Kraftfahrzeugverbundbremsscheiben mit mikroformschlüssiger Pressverbindung durch harte Partikel in der Pressfuge. In: Welle-Nabe-Verbindungen – Gestaltung-Fertigung-Anwendungen, Wiesloch b. Heidelberg, VDI-Berichte Nr. 2004, 2007
- Mayer, R.:** Neue Generation von Kraftfahrzeugverbundbremsscheiben für hohe Drehmomentübertragung. In: brems.tech, München, 07./08. Dezember 2006
- Mitschke, M. / Wallentowitz, H.:** Dynamik der Kraftfahrzeuge. 4. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004
- Neudeck, D.; Wüllner, A.:** Bremsen mit nichtmetallischen Bremscheiben. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik. ATZ/MTZ-Fachbuch, 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006
- Olms, H.; Marschner, H.; Reuter, M.; Schiffner, K.; Bletz, M.; Weiss, D.:** Bremsentechnisches Versuchswesen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik. ATZ/MTZ-Fachbuch, 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006
- Omega:** Internetseite – Emissivity of Common Materials. (URL: <http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/emissivitya.html>, abgerufen am 17.08.2012)
- Ostermann, F.:** Anwendungstechnologie Aluminium. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- Pahl, G. / Beitz, W. / Feldhusen, J. / Grote, K.-H.:** Pahl/Beitz. – Konstruktionslehre. 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007

**Ponn, J. / Lindemann, U.:** Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008

**Qu, J. / Blau, P. J. / Jolly, B. C.:** Oxygen-diffused titanium as a candidate brake rotor material. In: *Wear* 267 (2009), S. 818–822, 2009

**Reif, K. (Hrsg.):** Bremsen und Bremsregelsysteme. Bosch Fachinformation Automobil, 1. Auflage, Vieweg & Teubner Verlag/Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2010

**Remfrey, J.; Gruber, S.; Ocvirk, N.:** Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen. In: Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): *Bremsenhandbuch – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik*. ATZ/MTZ-Fachbuch, 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006

**Runge, M.:** Drücken und Drückwalzen: Umformtechnik, Werkstückgestaltung, Maschinen, Steuerungskonzepte. Wissen und Technik, Lippert-Druck GmbH, Radevormwald, 1993

**Sardá, A. H.:** Wirkungskette der Entstehung von Hotspots und Heißrubbeln in Pkw-Scheibenbremsen. Dissertation TU Darmstadt, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 704, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2009

**Schorn, M.:** Produkt- und Prozessinnovation von Grauguss-Bremsscheiben, In: XXVI. Internationales  $\mu$ -Symposium – Bremsen-Fachtagung, Bad Neuenahr, 16./17. Juni 2006, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 620, VDI-Verlag Düsseldorf, S. 1–12, 2006

**Schumann, M.:** Analysemethode zur Beurteilung des ungleichförmigen Brems Scheibenverschleißes an Pkw-Scheibenbremsen. Dissertation TU Darmstadt, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 635, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007

**Schütz, T.:** Ein Beitrag zur Berechnung der Bremsenkühlung an Kraftfahrzeugen. Dissertation Universität Stuttgart, 2009

**SGL Group – The Carbon Company / SGL BRAKES GmbH (Hrsg.):** Carbon-Keramik-Bremsscheiben – Eine Erfolgsgeschichte. SGL CARBON AG, Wiesbaden, 2007

**Sheridan, D. C. / Kutchey, J. A. / Samie, F.:** Approaches to the thermal modeling of disk brakes. SAE Technical Paper 880256, 1988

**Shibata, K. / Kawasaki, K.:** Untersuchung der tribologischen Eigenschaften von Al-MMC-Bremsscheiben und Reibmaterial. In: XX. Internationales  $\mu$ -Symposium – Bremsen-Fachtagung, Bad Neuenahr, 27./28. Oktober 2000, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 440, VDI-Verlag Düsseldorf, S. 9–29, 2000

- Sisson, A. E.:** Thermal Analysis of Vented Brake Rotors. SAE Technical Paper 780352, 1978
- SMART Engineering:** Internetseite – FEM. (URL: <http://www.smart-fem.de/fem.html>, abgerufen am 07.04.2012)
- Speicher, M. F.:** Kohlenstofffaserverstärkte SiC-Keramiken für Leichtbau-Bremscheiben. Dissertation Universität Stuttgart, 2003
- Straffelini, G.; Pellizzari, M.; Maines, L.; Molinari, A.:** Friction and wear behaviour of an Al-based metal-matrix composite against automobile friction materials. In: International Journal of Materials & Product Technology, Vol. 17, Nos 3/4, S. 275–290, 2002
- VDA-Verband der Automobilindustrie:** Handeln für den Klimaschutz – CO<sub>2</sub> Reduktion in der Automobilindustrie, 2009
- VDI-Gesellschaft und Verfahrenstechnik (Hrsg.):** VDI-Wärmeatlas. 10. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006
- VDI-Gesellschaft und Verfahrenstechnik (Hrsg.):** VDI-Wärmeatlas – Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 9. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2002
- Vitzthum, E. / Lenke, I.:** Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe für tribologische Anwendung. In: Seminarreihe „Technische Keramik in der Praxis“, Herausgeber: Informationszentrum Technische Keramik (IZTK) in Zusammenarbeit mit den Mitgliedsfirmen der Fachgruppe Technische Keramik im Verband der Keramischen Industrie e.V., 2005
- viZaar AG:** Internetseite – Emissionsgrad-Tabelle. (URL: <http://www.thermografie-xtra.de/de/waermebildkamera-tips-tricks-know-how/emissionsgrad-tabelle.html>, abgerufen am 17.08.2012)
- Weißbach, W.:** Werkstoffkunde. Viewegs Fachbücher der Technik, 16. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007
- Wiedemann, J.:** Leichtbau. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- Witt, G. et al:** Taschenbuch der Fertigungstechnik. Carl Hanser Verlag München Wien, 2006
- Yamabe, J. / Takagi, M. / Matsui, T.:** Development of Disc Brake Rotors for Heavy- and Medium-Duty Trucks with High Thermal Fatigue Strength. In: Mitsubishi Motors Technical Review, No.15, S. 42–51, 2003

**Zametica, H.; Schmitz, J.; Hoffmann, I.:** Bremsscheibe und Verfahren zu deren Herstellung. Offenlegungsschrift DE 10 2010 007 082 A1, 2010

## **Eigene Veröffentlichungen und Patentanmeldungen**

**Füllgrabe, F. / Ramser, S. / Rodeck, N. / Hoffmann, I.:** Bremsscheibe und Verfahren zu deren Herstellung. Offenlegungsschrift DE 10 2009 029 781 A1, 2009

**Füllgrabe, F. / Türk, M. / Tscherepanow, W. / Hoffmann, I.:** Verfahren zur Herstellung einer Bremsscheibe und nach dem Verfahren hergestellte Bremsscheibe. Europäische Patentschrift EP 2 263 813 B1, 2010  
(Erstveröffentlichung als Offenlegungsschrift DE 10 2009 029 780 A1, 2009)

**Füllgrabe, F. / Winner, H. / Hoffmann, I.:** New Joining Methods for Composite Brake Disks. SAE-Paper 2010-01-1704, 28th SAE Brake Colloquium and Exhibition, Phoenix, Arizona, USA, 2010

**Füllgrabe, F. / Winner, H. / Kiefer, A. / Fischer, S. / Hoffmann, I.:** Simulative Analysis and Experimental Investigation of Innovative Lightweight Brake Discs. 6th European Conference on Braking, Lille, Frankreich, 2010

**Hoffmann, I. / Füllgrabe, F. / Winner, H.:** Die Zukunft der Bremsscheibe im Umfeld des Leichtbaus. TMD Friction GmbH, Leverkusen VDI Verlag, Düsseldorf, 2010, XXVI. Internationales  $\mu$ -Symposium 2010, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 728

## Betreute studentische Arbeiten

- Feiling, A.:** Analyse des Einflusses verschiedener Parameter auf die thermische Performance einer Pkw-Bremsscheibe. 2009, Bachelor-Thesis Nr. 997/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Fischer, S.:** Entwicklung eines Simulationsmodells für Pkw-Bremsscheiben. 2008, Studienarbeit Nr. 976/08 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Fischl, M.:** Entwicklung und Verifizierung eines Versuchsaufbaus zur Untersuchung neuartiger Leichtbau-Bremsscheiben. 2011, Bachelor-Thesis Nr. 1047/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Frank, W.:** Konzeption und Validierung eines Reibrings für eine Leichtbau-Bremsscheibe. 2009, Studienarbeit Nr. 1007/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Kiefer, A.:** Entwicklung einer Leichtbau-Bremsscheibe mit stoffschlüssiger Anbindung von Topf und Reibring. 2009, Studienarbeit Nr. 1000/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Kieper, P.:** Entwicklung und Bewertung kostengünstiger Verbindungskonzepte für eine Leichtbau-Bremsscheibe. 2011, Bachelor-Thesis Nr. 1044/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Kilicbeyli, B.:** Konzeptentwicklung zur Nutzung der rotatorischen und thermischen Energie einer Bremsscheibe in Pkw. 2009, Master-Thesis Nr. 453/08 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Klampfl, M.:** Analyse des Spannungs- und Verformungsverhaltens von Bremsscheiben-Reibringen unter thermischer Belastung. 2010, Diplomarbeit Nr. 474/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Lotz, A.:** Analyse der Einflussparameter auf das Abkühlverhalten von Bremsscheiben. 2011, Bachelor-Thesis Nr. 1046/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Palm, D.:** Konzeption und Validierung eines Bremsscheibentopfes für eine Leichtbau-Bremsscheibe. 2009, Studienarbeit Nr. 1008/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

- Ramser, S.:** Bewertung der Übertragbarkeit bekannter Leichtbaukonzepte auf Pkw-Bremsscheiben. 2008, Studienarbeit Nr. 965/08 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Raß, F.:** Entwicklung eines thermomechanischen Modells für eine Leichtbau-Bremsscheibe. 2010, Diplomarbeit Nr. 466/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Rodeck, N.:** Entwicklung einer Leichtbau-Bremsscheibe mit kombiniertschlüssiger Anbindung zwischen Bremsscheibentopf und –reibring. 2009, Studienarbeit Nr. 992/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Sauer, R.:** Optimierung eines Anbindungselements für eine reibgeschweißte Leichtbau-Bremsscheibe hinsichtlich Massenersparnis und Schirmung. 2011, Diplomarbeit Nr. 484/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Schäfer, M.:** Entwicklung einer Sensorik zur Erkennung von Rissen in Pkw-Bremsscheiben. 2009, Diplomarbeit Nr. 461/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Steiner, C.:** Konzeptentwicklung und -bewertung von Zusatzfunktionen für eine Pkw-Bremsscheibe. 2008, Diplomarbeit Nr. 443/08 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Tscherepanow, W.:** Konzeption eines Bremsscheibentopfes für eine Verbundbrems-scheibe unter Einbindung umformender Fertigungsverfahren. 2009, Studienarbeit Nr. 988/08 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt



# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Florian Füllgrabe  
Geburtsdatum: 24.01.1982  
Geburtsort: Wolfsburg

## Berufliche Tätigkeit

seit 05/2011: Ingenieur im Bereich Entwicklungsbegleitung /  
Produktkostenoptimierung  
AUDI AG, Ingolstadt  
12/2007 – 04/2011: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet  
Fahrzeugtechnik (FZD) der TU Darmstadt

## Ausbildung

10/2002 – 12/2007: Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der  
TU Darmstadt, Abschluss als Dipl.-Ing.  
Thema der Diplomarbeit: Untersuchungen an neuartigen  
Partikelfiltersubstraten für Pkw Dieselmotoren  
06/2001: Abitur am Ratsgymnasium Wolfsburg